

# **ESTIMACIÓN DE EXTENSIONES DE TIEMPO PARA MOVIMIENTOS DE TIERRA EN LA CONSTRUCCIÓN DEBIDO A LA LLUVIA EN EL VALLE DE ABURRÁ**

**JUAN DAVID UPEGUI ESCOBAR**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director:**

**Carlos Daniel Ruiz Carrascal**

**Ingeniero Civil, Magíster en Aprovechamiento de  
Recursos Hidráulicos, M.A. in Climate and Society, MPhil  
in Earth and Environmental Sciences, PhD in Earth and  
Environmental Sciences**



**UNIVERSIDAD EIA  
INGENIERÍA CIVIL  
ENVIGADO  
2017**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

*A Dios, a quienes me  
han acompañado en mi  
formación y a mi familia,  
especialmente a mi  
madre que siempre ha  
dado todo de sí por sus  
hijos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quisiera agradecerle a Dios y a la santísima Virgen María por todas las bendiciones que han derramado sobre mí, las cuales me han permitido llegar a donde estoy y me ayudarán a continuar con mi camino.

En segundo lugar debo agradecer a mi madre por entregarse por completo a sus hijos, por llegar a quitarse el pan de la boca para dárnoslo y por trabajar incansablemente para hacer de mi hermano y de mí dos hombres de bien encaminados por el mejor rumbo.

Quisiera agradecer además a todos aquellos que me han acompañado en mi proceso de formación, especialmente a:

A Daniel Ruiz quien se lleva toda mi admiración por la calidad de profesional que es y por ser además quién me ayudó en el proceso de materialización de este proyecto al concederme el honor de tenerlo como director de trabajo de grado.

A la empresa Conconcreto y más específicamente a la ingeniera Alejandra Carmona por su ayuda y contribución para este trabajo, siendo una pieza clave para la efectiva culminación del mismo.

A Jorge Aristizábal quien diera pie al tema de investigación del presente trabajo y por el que siempre tendré admiración.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

# CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	20
1. PRELIMINARES.....	22
1.1 Planteamiento del problema .....	22
1.2 Objetivos del proyecto .....	24
1.2.1 Objetivo General .....	24
1.2.2 Objetivos Específicos .....	24
1.3 Marco de referencia .....	25
2. METODOLOGÍA.....	28
2.1 Requerimientos de información .....	28
2.2 Corrección y depuración de la información obtenida .....	31
2.3 Caracterización climática de las condiciones de lluvia en el valle de aburrá 31	
2.3.1 Análisis multianual de la lámina de lluvia total anual.....	32
2.3.2 Análisis multianual de las láminas de lluvias totales trimestrales .....	32
2.3.3 Análisis multianual de las láminas de lluvias totales mensuales .....	32
2.3.4 Análisis multianual de la lámina de lluvia total diaria.....	32
2.3.5 Análisis multianual de las láminas de lluvia totales cada 15 minutos.	35
2.4 Determinación del umbral de lluvia para la interrupción del movimiento de tierras.....	37
2.5 Determinación del tiempos de extensión para movimiento de tierras .....	38

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.6 Validación de los umbrales propuestos mediante comparación con un caso real .....	39
3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	40
3.1 Resultados de la Corrección y depuración de la información obtenida ....	40
3.2 Resultados de la Caracterización climática de las condiciones de lluvia en el Valle de Aburrá .....	43
3.2.1 Resultados del análisis de las láminas de lluvia totales anuales multianuales .....	43
3.2.2 Resultados del análisis de las láminas de lluvia totales trimestrales multianuales .....	43
3.2.3 Resultados del análisis multianual de las láminas de lluvia totales mensuales .....	44
3.2.4 Resultados del análisis multianual de la lámina de lluvia total diaria .	45
3.2.5 Resultados del análisis multianual de la precipitación total cada 15 minutos.....	59
3.3 Resultado de la determinación del umbral de lluvia para la interrupción del movimiento de tierras. ....	65
3.4 Resultados de la determinación del tiempos de extensión para movimiento de tierras.....	68
4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES .....	72
5. REFERENCIAS.....	74
ANEXO 1 .....	77

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1.- Registros de precipitación diaria.....	28
Tabla 2.- Registros obtenidos de precipitación cada 15 minutos. ....	30
Tabla 3.- Ejemplo de la matriz de Joint Probability .....	33
Tabla 4.- Ejemplo de matriz de probabilidades de precipitación máxima en 15 minutos según hora del día y mes del año. ....	36
Tabla 5.- Ejemplo de matriz de probabilidades de precipitación máxima en 15 minutos según hora del día y mes del año para un horario laboral.....	36
Tabla 6.- Registros diarios de precipitación faltante. ....	40
Tabla 7.- Matriz de probabilidad conjunta para transiciones entre estados de humedad para la estación Olaya Herrera. ....	48
Tabla 8.- Probabilidades conjuntas de transición de estados de humedad, discriminada por mes para la estación Olaya Herrera. ....	49
Tabla 9.- Correlación y $R^2$ entre señales y anomalías de precipitación total anual para la estación Olaya Herrera. ....	54
Tabla 10.- Correlación y $R^2$ entre señales y anomalías de la lámina de lluvia total del trimestre Junio-Julio-Agosto para la estación Olaya Herrera. ....	56
Tabla 11.- Matriz de probabilidades de lámina de lluvia máxima de 15 minutos de duración según la hora del día y mes del año para la estación Planta de Filtros Villahermosa .....	62

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1: Pluviograma (lado izquierdo) siendo registrado por un pluviógrafo (lado derecho).....	13
Figura 2: Ejemplo de un diagrama de Gantt. ....	14
Figura 3.- Ubicación espacial de las estaciones con precipitación diaria procesadas. ....	29
Figura 4.- Percentil 95° de lluvia total diaria para las estaciones del Valle de Aburrá .....	47

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1.- Gráfica de la probabilidad de tener entre 2 y 9 días consecutivos con lámina de lluvia superior al umbral de 5 mm por mes.....	77



## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1: Representación gráfica característica de las curvas IDF para una estación pluviográfica. ....	16
Gráfica 2: Curvas características de funciones de distribución normales de probabilidad acumulada. ....	17
Gráfica 3.- Histograma de la lámina de lluvia total anual para la estación Medellín. ....	43
Gráfica 4.- Histograma de la lámina de lluvia total para la estación Marzo-Abril-Mayo para la estación Planta de Filtros Villahermosa. ....	44
Gráfica 5.- Distribución de la lluvia total mensual en un año para la estación San Antonio de Prado. ....	45
Gráfica 6.- Histograma de lámina de lluvia total diaria para la estación Olaya Herrera.....	46
Gráfica 7.- Rachas máximas de días lluviosos continuos por año en la estación Olaya Herrera. ....	48
Gráfica 8.- Probabilidades de transición Wet-Wet por mes vs total multianual para la estación Olaya Herrera. ....	50
Gráfica 9.- Probabilidad de transición a un día con estado de humedad lluvioso. .	51
Gráfica 10.- Anomalías en la lámina de lluvia total anual de la estación Olaya Herrera.....	53
Gráfica 11.- Anomalías en la lámina de lluvia total para el trimestre Sep-Oct-Nov de la estación Olaya Herrera. ....	54
Gráfica 12.- Señales climáticas sobre anomalías de la lámina de lluvia total anual de la estación Olaya Herrera. ....	55

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Gráfica 13.- Señales climáticas sobre anomalías de la lámina de lluvia precipitación total para el trimestre Junio-Julio-Agosto de la estación Olaya Herrera.....	56
Gráfica 14.- Probabilidad de transición a un día con estado de humedad lluvioso para la estación Olaya Herrera según los resultados de simulación del modelo MPI-ESM-LR.....	57
Gráfica 15.- Señal climática ENSO sobre anomalías de probabilidad de transición a estado lluvioso para la estación Olaya Herrera según los resultados de simulación del modelo GISS-E2-R.....	58
Gráfica 16.- Proyección de probabilidad de transición a un día con estado de humedad lluvioso del modelo MPI-ESM-LR, escenario RCP 8.5, para la estación Olaya Herrera. ....	59
Gráfica 17.- Gráfica de burbujas para la lámina de lluvia máxima de 15 minutos de duración por mes según los registros de la estación Planta de Filtros Villahermosa. ....	60
Gráfica 18.- Gráfica de burbujas para la lámina de lluvia máxima de 15 minutos de duración por mes (máximo multianual) según los registros de la estación Planta de Filtros Villahermosa. ....	61
Gráfica 19.- Superficie de probabilidades de eventos máximos de lluvia de 15 minutos de duración en una hora del día para la estación Planta de Filtros Villahermosa. ....	64
Gráfica 20.- Porcentaje acumulado de la lámina de lluvia total diaria en la estación Olaya Herrera producto del análisis multianual.....	65
Gráfica 21.- Porcentaje acumulado de la lámina de lluvia total diaria por trimestre en la estación Olaya Herrera, producto del análisis multianual. ....	66
Gráfica 22.- Porcentaje acumulado de la lámina de lluvia total diaria por mes en la estación Olaya Herrera, producto del análisis multianual. ....	66
Gráfica 23.- Probabilidad por trimestre de tener al menos un día con lámina de lluvia superior a 5mm.....	67
Gráfica 24.- Probabilidad por mes de tener al menos 1 día con lámina de lluvia superior a 5mm. ....	68

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Gráfica 25.- $p(A)$ por mes. ....	69
Gráfica 26.- $p(A B)$ por mes como resultado del análisis de la estación Villa Hermosa. ....	69
Gráfica 27.- $p(A \cap B)$ por mes como resultado del análisis de la información disponible de la estación Villa Hermosa. ....	70
Gráfica 28.- Probabilidad de tener entre 2 y 9 días consecutivos con lámina de lluvia superior a 5 mm. ....	71

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## GLOSARIO

**PRECIPITACIÓN:** se refiere al agua que cae de la atmósfera sobre la superficie del planeta. Ésta puede ser líquida (se denomina lluvia ligera cuando las gotas tienen diámetros menores a 0.5 milímetros (mm) o lluvia cuando las gotas tienen diámetros en el rango 0.5 mm a 6 mm) o sólida (se denomina granizo cuando se precipitan pequeñas bolas o trozos de hielo formados en las nubes; nieve cuando se forma por la acumulación y organización de pequeños cristales de hielo; *ice pellets* cuando las estructuras de cristales de hielo han iniciado el proceso de fusión, pero se vuelven a congelar en su descenso a través de aire frío; o mezcla lluvia-nieve, cuando es nieve que ha comenzado a derretirse antes de caer sobre la superficie del suelo) (Met Office, 2016). En adelante, y debido a que en su mayoría la precipitación sobre el Valle de Aburrá es líquida, se referirá a ésta simplemente como lluvia.

**ESTACIÓN METEOROLÓGICA:** dispositivo que recolecta información relacionada con el clima y el medio ambiente usando diferentes sensores. Entre ellos se encuentran algunos como termómetros para la medición de la temperatura, barómetros para presión, y pluviómetros o pluviógrafos para la cantidad o lámina de lluvia (AcuRite, 2012).

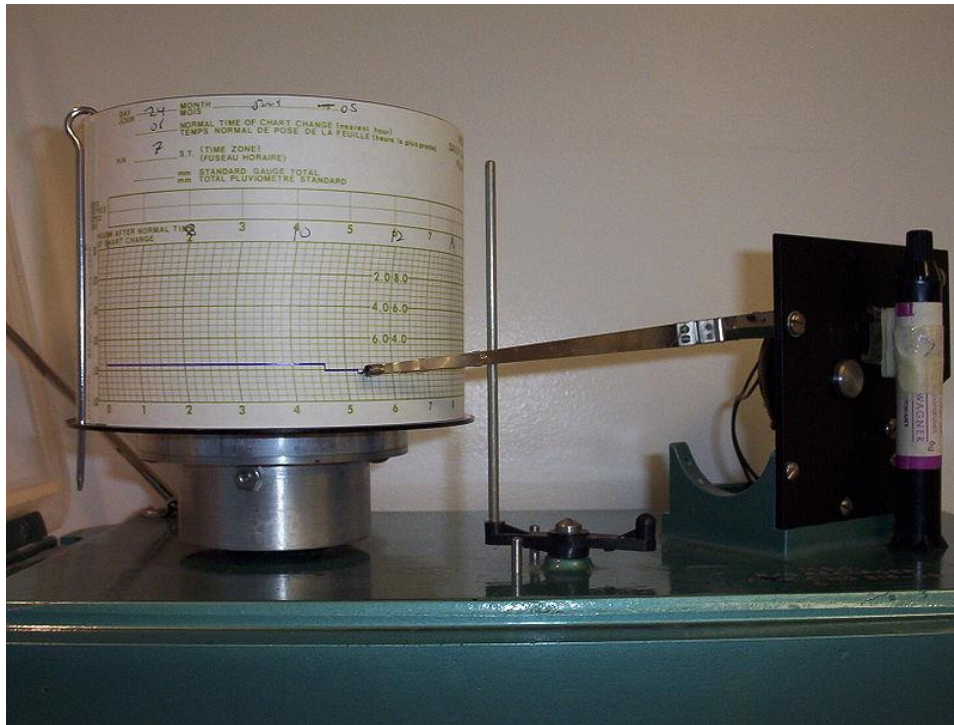
**PLUVIÓMETRO:** instrumento que permite medir la lámina de precipitación diaria tomando datos discretos con un intervalo de tiempo diario.

**PLUVIÓGRAFO:** instrumento que como el pluviómetro permite recolección y almacenamiento de información de precipitación líquida, con la diferencia de que el pluviógrafo registra datos continuos en el tiempo, gracias a que los consigna en un pluviograma. Se compone de un grafo que va marcando su recorrido, según la lámina de precipitación, en un pluviograma. Un ejemplo de un pluviógrafo puede ser visto en la Figura 1.

**PLUVIOGRAMA:** medio en el cual quedan consignados los datos de precipitación líquida de una estación pluviográfica. Se compone por un papel especialmente cuadriculado y escalado, en el cual queda marcado el trazo del pluviógrafo, convirtiéndole así en un pluviograma. Un ejemplo de un pluviograma puede ser visto en la Figura 1.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Figura 1: Pluviograma (lado izquierdo) siendo registrado por un pluviógrafo (lado derecho)**



*Fuente: (The Constructor - Civil Engineering Home, s.f.)*

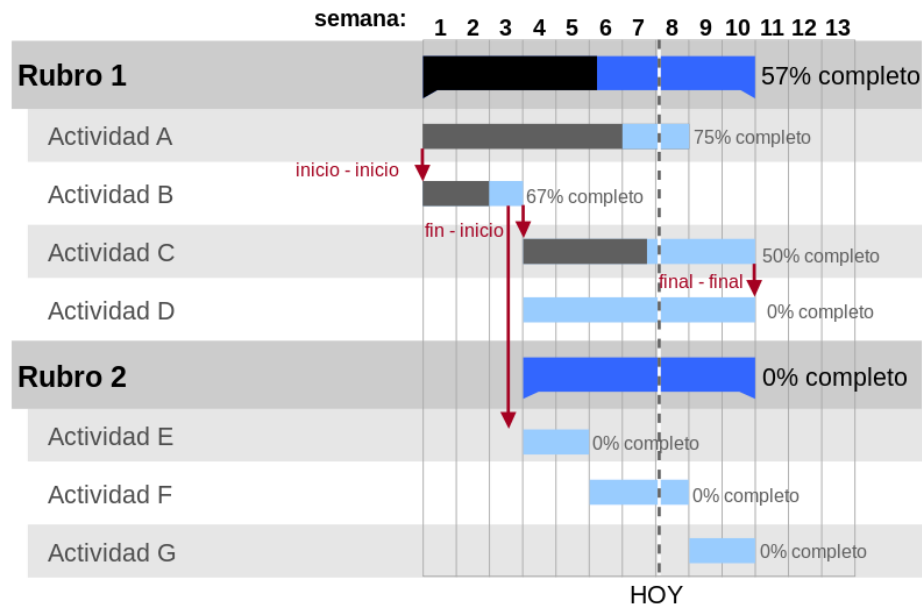
**HOLGURA:** “Espacio vacío entre dos piezas que han de encajar una en otra” (RAE, 2001), que, acoplado al ámbito de la construcción, se refiere al tiempo de retraso que pueden tener algunas actividades de obra sin afectar la duración del proyecto.

**RUTA CRÍTICA:** actividades que definen la duración total de la obra, es decir, actividades que no poseen holgura alguna. Si existe retraso en alguna de las actividades de la ruta crítica, esto afectará la duración total del proyecto.

**DIAGRAMA DE GANTT:** es una manera gráfica de programar tareas y planificar actividades sobre un periodo de tiempo determinado. Es de gran utilidad en las obras de construcción, pues permite percibir de manera gráfica y eficiente el avance de la obra. Ver Figura 2.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Figura 2: Ejemplo de un diagrama de Gantt.**



*Fuente: (Fèvre, 2011)*

**CALENDARIO DE OBRA:** ubicado gráficamente en un calendario mediante un diagrama de Gantt, es el tiempo estimado que marcará la pauta o ritmo de la obra (Revista ARQHYS, 2012). Es decir, la ubicación temporal de cada una de las actividades a desarrollar en la obra.

**VALORES ESPÚRIOS** (o dato atípico): dato falso o que no representa a la muestra, ya que se encuentra numéricamente muy distante al resto de datos de la muestra. Estos datos pueden afectar a las medidas de tendencia central, por lo que en ocasiones es recomendable omitirlos.

**TEORÍA Y DISTRIBUCIONES DE VALORES EXTREMOS:** a los registros extremos de precipitación se les puede ajustar distribuciones de valores extremos las cuales se definen por la teoría de valores extremos. Esta es una rama de la teoría de probabilidad ampliamente usada en el campo de la ingeniería y la construcción, que se centra en explicar valores extremos a través de una serie de modelos o distribuciones naturales (Iñaki, 2000). Existen tres distribuciones de valores extremos: Tipo 1 (Gumbel), Tipo 2 (Fréchet) y Tipo 3 (Weibull). Las tres distribuciones mencionadas en el teorema se llaman, en conjunto, las distribuciones de valores extremos (Ortega, 2008), y se utilizan para modelar la

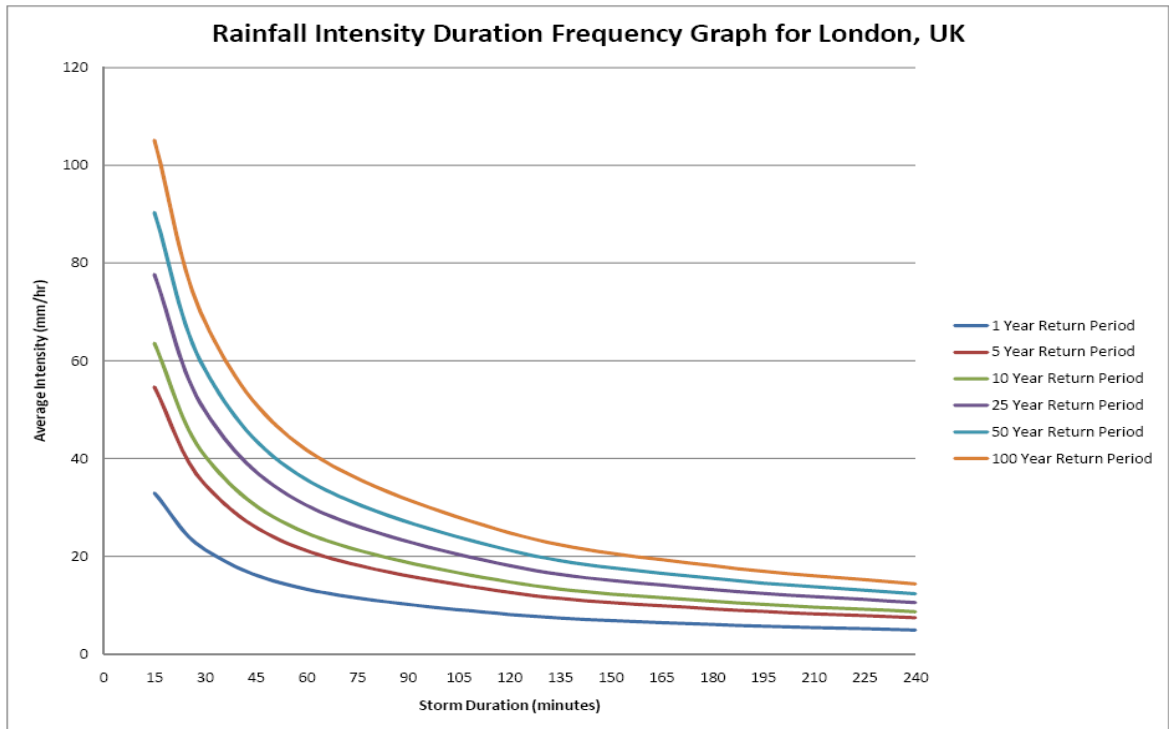
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

distribución del máximo o mínimo de un conjunto de datos con distribución normal o exponencial.

**PERIODO DE RETORNO ( $T_r$ ):** intervalo de recurrencia, al lapso promedio en años, entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad, del  $m$ -ésimo evento de los  $n$  registros (SAGARPA, 2014).

**CURVAS Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF):** curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media de precipitación en intervalos de diferente duración y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o periodo de retorno (Témez, 1978). En las curvas IDF se puede leer cual será la lámina esperada para una tormenta que se repite cada cierta cantidad de tiempo ( $T_r$ ) y de determinada duración. En la abscisa se encuentra la duración de la tormenta en minutos; en las ordenadas la intensidad de la lluvia en mm/h; cada curva representa un periodo de retorno diferente expresado en años. Véase Gráfica 1.

**Gráfica 1: Representación gráfica característica de las curvas IDF para una estación pluviográfica.**



*Fuente: (The Critical Flow, 2010)*

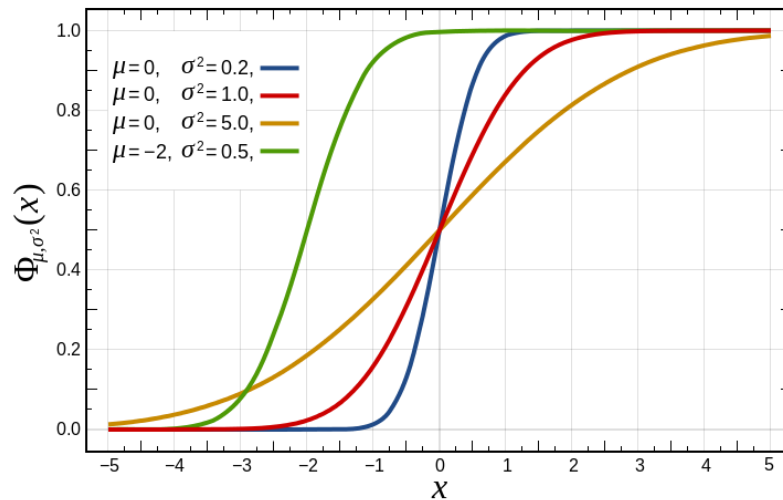
**CADENA DE MARKOV:** cadena de observaciones o ensayos en donde los resultados son finitos, y cada uno depende sólo del resultado inmediatamente anterior.

**FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA:** describe la de que una observación aleatoria que se toma de la población sea menor que o igual a cierto valor (Minitab 18, s.f.). Véase Gráfica 2.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



**Gráfica 2: Curvas características de funciones de distribución normales de probabilidad acumulada.**



*Fuente: (Inductiveload, 2008)*

**PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE:** permite comprobar la validez de la hipótesis que indica que la población de la que proviene cierta muestra de datos tiene una determinada distribución. Existen diferentes tipos de pruebas de bondad de ajuste como la prueba  $\chi^2$ -Cuadrada, la prueba Smirnov-Kolmogorov o la prueba de los promedios (Bioingeniería, s.f.).

**PERCENTILES:** medidas de posición utilizadas en la estadística para determinar, a partir de un conjunto de datos organizados, cuál es el dato que deja el porcentaje determinado (percentil) de datos por debajo de él.

## RESUMEN

Al analizar la ruta crítica de los proyectos de infraestructura, se encuentra que los movimientos de tierra en las labores de construcción constituyen una de las actividades con menor holgura. Por esto, los encargados de la elaboración de los calendarios de obra incluyen un tiempo extra de duración a los proyectos para atender diferentes necesidades o imprevistos que puedan retrasar las actividades.

Sin embargo, en el caso de las interrupciones por lluvia, el método utilizado para la asignación de dichos tiempos de holgura agregados se da bajo el criterio de un experto, y no lleva intrínseco un proceso científico que de fundamento teórico al tiempo de extensión planteado. Por tal motivo, en ocasiones, dichos tiempos no son suficientes para cubrir los retrasos de la obra y sus encargados se ven en la obligación de tomar correctivos sobre la marcha para compensar esta afectación.

El presente trabajo se enfoca en analizar los datos de precipitación de 15 estaciones pluviométricas y pluviográficas del Valle de Aburrá (algunas con hasta 74 años de registro) para determinar, basado en la historia y en diferentes modelos climáticos, cuáles pueden ser las probabilidades de suspensión de las actividades en obra debido a eventos de lluvia, dependiendo de la fechas en que se lleven a cabo las mismas.

Se analizaron los registros horarios de precipitación para entender la distribución de la lluvia en el día, se compararon los resultados de simulación de cuatro modelos climáticos con la historia de registros diarios de una de las estaciones con período instrumental extenso (estación Olaya Herrera), y se seleccionó el modelo de circulación general que mejor describe el comportamiento de la precipitación en el sitio de interés para realizar proyecciones. Posteriormente, se revisaron las bitácoras de construcción de una obra actual, de manera que fuera posible encontrar el percentil de lluvia a partir del cual se suspenden las actividades de obra.

Finalmente, se encuentra el umbral de lámina de lluvia asociado a la interrupción del movimiento de tierras para encontrar, con ayuda del análisis de los registros horarios, la probabilidad de tener al menos una suspensión de obra debido a una lámina de lluvia superior al umbral de interrupción presentada en el horario laboral, además de la probabilidad de tener al menos dos o más días consecutivos en los que se supere tal lámina.

Palabras clave: lluvia, lámina de precipitación, interrupciones de obra.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## **ABSTRACT**

Land excavations and grading are among the set of construction activities with the least time buffers to task durations in current construction plans and schedules. Construction planners and managers usually add extra time during the planning of individual development projects in order to compensate for potential uncertainties and incidentals in task durations. However, weather effects and influence on activity durations have not received particular attention in the estimation of unexpected tasks delays, thus leading in some cases to extra costs in development projects. In the assessment of the influence of rainstorm events on tasks durations, time buffers are commonly added based on purely the expertise of construction planners. Therefore, the analysis lacks a robust scientifically-based assessment of time delays due to the random effect of weather conditions on the productivity of many activities. In my research, ground-truth data gathered at a set of fifteen weather stations installed in the Aburrá Valley are processed to assess the likelihood of potential delays in the execution of land excavations. Hourly and daily records were processed to quantify the diurnal cycle of rainfall amounts and to assess the likelihood of the occurrence of rainy days and wet spells in a given month. The analysis is complemented with the processing of the simulation outputs of a group of well-known global circulation models with high skill levels for the area under study. Lastly, an actual, ongoing development initiative was studied to define the threshold of daily rainfall amounts that prompted time delays in the early activities of the construction project. A set of adjustment factors for unexpected weather conditions are proposed herein at a monthly timescale to incorporate the effects of local weather on the duration of excavation and grading tasks in future construction planning and scheduling.

Keywords: rainfall, rainfall amount, time delays in construction tasks.

## INTRODUCCIÓN

El problema de las interrupciones por lluvia es uno de los más recurrentes en las obras de infraestructura. Una de las actividades más afectadas por este fenómeno es el movimiento de tierras.

Actualmente los encargados de la planeación de las actividades en obra hacen frente a este problema al proponer tiempos de extensión para sus actividades basados en el juicio de un experto. Sin embargo, estos tiempos propuestos suelen no ser suficientes, por lo que las obras sufren retrasos que afectan directamente la economía del proyecto.

El presente trabajo pretende, a partir de un análisis de registros pluviográficos y pluviométricos de precipitación diaria y de 15 minutos de duración de 15 estaciones del Valle de Aburrá, proponer estimaciones de tiempos (expresadas en probabilidad de suspensión) para la actividad de movimientos de tierra en la construcción.

Este documento se compone de 4 partes principales:

En la primera parte se encuentran los preliminares, en donde se amplía el planteamiento del problema, se exponen los objetivos del trabajo y se expone bajo que marco de referencia se desarrolla la tesis.

En la segunda parte se expone la metodología utilizada para el desarrollo del presente trabajo. Esta metodología se divide, a su vez, en 5 importantes partes que detallan: los requerimientos de información, la corrección y depuración de la información para realizar un trabajo con información confiable, la caracterización climática de las condiciones de lluvia del Valle de Aburrá (desde un análisis interanual hasta el análisis de la precipitación cada 15 minutos), la determinación de umbrales de lámina de lluvia que eventualmente pueden suspender la actividad de movimiento de tierras (basado en información recolectada de un obra de construcción en el Valle de Aburrá), y la aproximación a tiempos de extensión (asociados a probabilidades) para el movimiento de tierras.

La tercera parte del documento presenta los resultados de los. Esta sección se divide, al igual que la metodología, para cada uno de los subtítulos de dicha sección.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Finalmente, en la cuarta parte se presentan las conclusiones, recomendaciones y consideraciones finales producto de los análisis realizados y los resultados obtenidos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

# **1. PRELIMINARES**

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Colombia se encuentra en una constante búsqueda de nuevas tecnologías y métodos que le permitan desarrollar su industria y, de esta forma, impulsar su economía.

Sin embargo, en la actualidad la esfera de la construcción en el ámbito de la ingeniería no ha sabido impulsar su desarrollo, pues continúa utilizando métodos desarrollados hasta medio siglo atrás (Aristizábal Vélez, Comunicación personal, 2016) o elementos inventados incluso hace milenios, como lo es el concreto. Esto se debe, entre otros factores, a que los métodos desarrollados en aquella época han sido confiables y seguros tanto para los procesos constructivos, como para la vida útil de los proyectos.

Sin embargo, muchas de las metodologías y técnicas usadas en estos métodos de construcción no tienen el suficiente rigor científico, por lo que muchas variables se asumen tomando como criterio la experiencia y pericia del ingeniero encargado. Esto lleva a que, a pesar de estar basadas en opiniones de expertos, algunas de las decisiones que se toman en estas construcciones estén viciadas o tengan alta probabilidad de error.

En las construcciones civiles, un factor fundamental a analizar es el estado del tiempo, pues éste afecta directamente al rendimiento y la productividad de los trabajadores, y puede generar retrasos, desórdenes y hasta discusiones en las partes de un proyecto. Muchas de las actividades a desarrollar en un proyecto de construcción, como los terraplenes, la fabricación de concreto y el manejo de los suelos, entre otras, se ven seriamente afectadas por la lluvia (Nguyen, y otros, 2010).

La interrupción inesperada de este tipo de actividades, debido a precipitaciones espontáneas, se ve reflejada en la pérdida de días laborales y en la extensión de la duración total del proyecto. Debido a esto, muchos contratistas agregan cláusulas a los contratos para tratar estas incertidumbres con el criterio del ingeniero encargado, de tal manera que se conceda así un tiempo al contratista para hacer frente a estos retrasos ocasionados por las condiciones climáticas (Kartam, 1999).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Prueba de esto es que, en Canadá, el clima fue la más frecuente razón para la petición de extensiones de tiempo en 57 proyectos de construcción encuestados, como se reporta en el artículo "Claims for extension of time in civil engineering projects" (Yogeswaran, Kumaraswamy, & Miller, 1998).

Además de la pérdida de tiempo, los retrasos en las construcciones civiles implican grandes sobrecostos, ya que además de ser necesario la extensión del salario del personal en el tiempo, se demandan más recursos de los presupuestados inicialmente en el contrato, afectando así la economía tanto de la empresa constructora como del país, y con ello se amenaza la optimización del recurso público o privado, en detrimento de los mismos proyectos o de sus obras.

Dada la implicación económica que tienen los retrasos y la incidencia de los factores climáticos (como la lluvia) en los mismo, algunos países como Colombia, y más específicamente la urbe del Valle de Aburrá en el departamento de Antioquia, lograron comprender la importancia de la instrumentación del país, por lo que desde el año 1942 comenzaron la instalación de estaciones para la medición de la precipitación en valle.

Esta recolección de información ha sido de gran utilidad para la comunidad científica, específicamente para los hidrólogos y climatólogos, ya que gracias a los datos recolectados por aquellas estaciones fue posible, por ejemplo, generar las curvas de intensidad-duración-frecuencia presentadas por Smith y Vélez en su libro "Hidrología de Antioquia", para diferentes estaciones pluviográficas del departamento, lo que les ha permitido a los ingenieros realizar diseños hidrológicos más ajustados a las necesidades reales.

Sin embargo, el manejo de este tipo de información se limita a eso: análisis hidrológicos, dejando de lado otro tipo de aplicaciones proporcionadas por un manejo diferente de la información pluviométrica y pluviográfica existente.

Algunos expertos en meteorología afirman que, para las regiones tropicales como Colombia, el comportamiento de los eventos de lluvia de gran magnitud se puede estudiar de manera confiable ajustando a los datos una distribución de valores extremos, ya que se ha evidenciado que en la mayoría de los casos este tipo de datos tiende a comportarse de esta forma (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

Un análisis diferente de este tipo de información permitiría determinar las probabilidades de excedencia de determinados umbrales de lluvia que afecten directamente la labor de las actividades de construcción tales como los movimientos de tierra, permitiendo así generar recomendaciones basadas en las

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

fuentes de información y en los umbrales de lluvia que cada constructor admite antes de interrumpir su actividad.

Tendiendo esto presente, se puede generar el siguiente interrogante: ¿será posible dar recomendaciones para extensiones de tiempo de actividades como movimientos de tierras para diferentes construcciones civiles locales, basado en el análisis de la información pluviográfica y pluviométrica disponible de algunas estaciones del Valle de Aburrá?

De la respuesta a este interrogante, se derivaría una posible solución al problema que actualmente tienen la mayoría de las constructoras del país, el cual se puede entender como que sus obras civiles están sufriendo retrasos que no han sido tenidos en cuenta a la hora de elaborar el contrato inicial, por la carencia de diferentes alternativas de manejo de los recursos de información pluviográfica disponible que permita un análisis orientado, en este caso, a las construcciones civiles, pues en Colombia no se implementa tipo alguno de rigor científico que permita conocer aproximación alguna (Aristizábal Gil, comunicación personal, 2016).

## **1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.2.1 Objetivo General**

Proponer tiempos de extensión debido a posibles retrasos por lluvia en los movimientos de tierra de las construcciones civiles del Valle de Aburrá a partir del análisis de información de estaciones pluviográficas o pluviométricas con registros confiables.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar la confiabilidad de los datos pluviométricos recolectados por las estaciones de precipitación líquida a analizar.
- Determinar probabilidades de excedencia de umbrales de interrupción en los movimientos de tierra a escala mensual, teniendo en cuenta las condiciones históricas observadas en las estaciones pluviométricas o pluviográficas con registros confiables.
- Generar recomendaciones de extensión de tiempo para la actividad de movimientos de tierra.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



- Verificar correlación de las recomendaciones generadas con la ocurrencia de eventos reales, mediante el análisis de un caso de estudio.

### 1.3 MARCO DE REFERENCIA

Como lo indica la introducción del libro Hidrología de Antioquia, “el objetivo básico de todo estudio hidrológico es lograr un entendimiento adecuado del comportamiento de la variable hidrológica de interés...” (Smith & Vélez, 1997). En el estudio meteorológico, el cual está estrechamente ligado con el hidrológico, ocurre lo mismo: se busca información que sea confiable, y ésta se trabaja para obtener el mejor entendimiento del fenómeno que se estudia.

En general, se busca el entendimiento de un fenómeno natural con miras a darle un mejor manejo, a tener anticipadamente un plan de acción ante este fenómeno y a tomar decisiones anticipadas que eviten, en mayor medida, cualquier complicación posible.

En este caso, el fenómeno a estudiar será la lluvia en el Valle de Aburrá, para lo cual será necesario la recopilación de la información registrada por 15 de las estaciones pluviográficas y pluviométricas disponibles en el valle y su entorno inmediato. Esta información debe ser confiable, consistente y que tenga un horizonte temporal de al menos 10 años (Smith & Vélez, 1997) para tener confiabilidad en su uso.

A la hora de analizar la lluvia y sus impactos sobre el calendario de obra, muchos investigadores han llegado a la misma y evidente conclusión: la lluvia es uno de los factores externos que más afecta el cumplimiento de los tiempos de obra (Nguyen, y otros, 2010).

En uno de los artículos científicos relacionados con el problema de estudio, se pudo evidenciar, por la revisión bibliográfica realizada por sus autores, que el tema ya ha sido abordado por diferentes investigadores como lo definen Nguyen, Kneppers y García (2010). Ellos conceptúan que *“el clima es un factor crucial causante de retrasos y sobre costos en las construcciones”* tomando como referencia publicaciones de Baldwin et al. (1971), Laufer (1990) y El-Razek (2008). Dan cuenta también de que algunos otros, como Grimm y Wagner (1974), Thomas et al. (1999) y El-Rayes y Moselhi (2001), han cuantificado los impactos que tiene la lluvia sobre la productividad en la construcción, mientras que varios estudios más, realizados por investigadores como Maunder et al. (1971), Benjamin y Greenwald (1973), Smith y Hancher (1989), Moselhi et al. (1997), Connors (2003), Xi et al. (2005), y Chan y Au (2008), han propuesto mejores prácticas en el tratamiento del riesgo relacionado con el clima, para las actividades de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

construcción, el cronograma de los proyectos, y sus costos, entre otros. Por otro lado, reportan que gran cantidad de estudios tales como los adelantados por Hinze y Couey (1989), han investigado cómo el clima es especificado en los contratos, mientras que Finke (1990) estudió cómo éste es reglamentado. Los autores concluyen que a pesar de existir estas investigaciones, sólo en algunos pocos estudios se ha tratado la diferencia entre un evento climático severo usual (predecible) y un evento climático severo inusual (impredecible) (Nguyen, y otros, 2010).

Otro de los artículos científicos consultados, da cuenta que algunos investigadores como Kavvas et al. (1977), Richardson (1981), Katz (1985) y Wales y AbouRizk (1996), han tenido éxito al modelar la precipitación mediante cadenas de Markov (Shahin, AbouRizk, & Mohamed, 2011), lo que permite tener un acercamiento a cómo es el comportamiento de los datos y cómo estos deben ser tratados. Sin embargo, estos estudios han sido adelantados en sitios por fuera de Colombia, específicamente en países del hemisferio norte, en donde el comportamiento climático es diferente al presentado en regiones tropicales. Investigadores como Chow (1988) o Maidment (1993) sugieren que el comportamiento de los datos de lluvia registrados en el trópico tienden a distribuirse de manera exponencial. Por lo tanto, al comportamiento de sus extremos (generalmente los extremos mayores, que serán eventos severos de lluvia) se puede ajustar una distribución de valores extremos ya sea Tipo 1 (Gumbel), Tipo 2 (Fréchet) o Tipo 3 (Weibull) lo que permite realizar un análisis de probabilidad de excedencia de determinados umbrales. Sin embargo, se espera que los umbrales de interrupción en las obras civiles no estén caracterizados por eventos de lluvia extrema, sino moderada, por lo que será necesario realizar diferentes ajustes de los datos de precipitación a funciones de distribución de probabilidad y realizar las correspondientes pruebas de bondad de ajuste para validar la procedencia de los datos de la distribución seleccionada como hipótesis. Una vez validada la prueba de bondad de ajuste, se le encuentra la función de distribución acumulada a los datos ajustados para así obtener los porcentajes de lluvia de los umbrales de interrupción de obra que los constructores consideren necesarios.

Se estudiarán datos de precipitación cada 15 minutos de las estaciones del Valle de Aburrá que provean estos registros (algunas diferentes a las tratadas con los registros diarios) para determinar el comportamiento tendencial de la lluvia en el día, de manera que sea posible encontrar las horas del día que tienen mayor probabilidad de presentar eventos de lluvia, dependiendo de la época del año.

También, es necesario obtener información de un caso de estudio real para validar las probabilidades propuestas; en el que una obra en construcción, específicamente en la fase de movimientos de tierra, haya registrado el avance de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

la obra en bitácoras en las que se queden consignados los días en los que fue necesario detener el trabajo debido a la lluvia. En caso de no contar con registros de causa, momento y duración de las interrupciones de la actividad en algún proyecto de construcción desarrollado dentro del área de interés, se procederá a la implementación o toma de estos registros en algún proyecto que se encuentre en esta etapa (cabe aclarar que los datos a registrar serán cuándo se interrumpe la actividad, cuál fue la causa de la interrupción y cuánto duró aquella interrupción, pero no se tomarán datos de pluviosidad en el sitio de construcción).

Es importante mencionar que en caso de ser necesario lo anterior, el tiempo de registros requerido será igual a la duración de la actividad de movimientos de tierra, pues las recomendaciones se generarían para esta actividad. Sin embargo, la duración de los movimientos de tierra cambia dependiendo de cada proyecto, por lo cual no sería posible dar un estimado general del tiempo de registros a tomar.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## 2. METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología propuesta para llevar a cabo los análisis del presente trabajo dirigido de grado.

### 2.1 REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN

Se analizaron los registros de precipitación líquida de varias estaciones instaladas en el Valle de Aburrá y los registros de interrupción de actividades en obra debido a la lluvia de un proyecto de interés de la constructora Conconcreto. Los registros de precipitación líquida incluyeron registros de precipitación diaria de 15 estaciones pluviométricas y pluviográficas distribuidas por todo el Valle de Aburrá, las cuales son operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y por Empresas Públicas de Medellín (EPM). En la Tabla 1 se presenta el código, nombre, operador y periodo de registros de la información de las estaciones.

**Tabla 1.- Registros de precipitación diaria.**

Código	Nombre de la estación	Fecha de inicio registros	Última fecha con registros	Operador de la estación
27015070	Aeropuerto Olaya Herrera	1 de enero de 1942	31 de agosto de 2017	IDEAM
2701036	Caldas	1 de agosto de 1949	31 de diciembre de 2012	EPM
2701037	Fabricato	15 de septiembre de 1949	31 de diciembre de 2012	EPM
2701038	San Antonio de Prado	29 de agosto de 1949	31 de diciembre de 2012	EPM
2701045	Planta de Filtros Villahermosa	8 de julio de 1948	31 de diciembre de 2012	EPM
2701046	San Cristóbal	25 de agosto de 1949	31 de diciembre de 2012	EPM
2701053	Alto San Andrés	10 de enero de 1959	31 de diciembre de 2012	EPM
2701056	Girardota	12 de enero de 1959	31 de diciembre de 2012	EPM
2701057	Barbosa	10 de enero de 1959	31 de diciembre de 2012	EPM
2701076	Niquía	3 de septiembre de 1984	30 de noviembre de 2012	EPM
2701093	Ayurá	1 de marzo de 1972	31 de diciembre de 2012	EPM
2701517	Medellín	1 de julio de 1954	31 de diciembre de 2012	EPM
2701950	Planta Manantiales	4 de julio de 1986	30 de noviembre de 2000	EPM
2701955	Descarga La Tasajera	25 de agosto de 1984	31 de diciembre de 2012	EPM
27015090	Tulio Ospina	1 de septiembre de	31 de diciembre de 2012	IDEAM

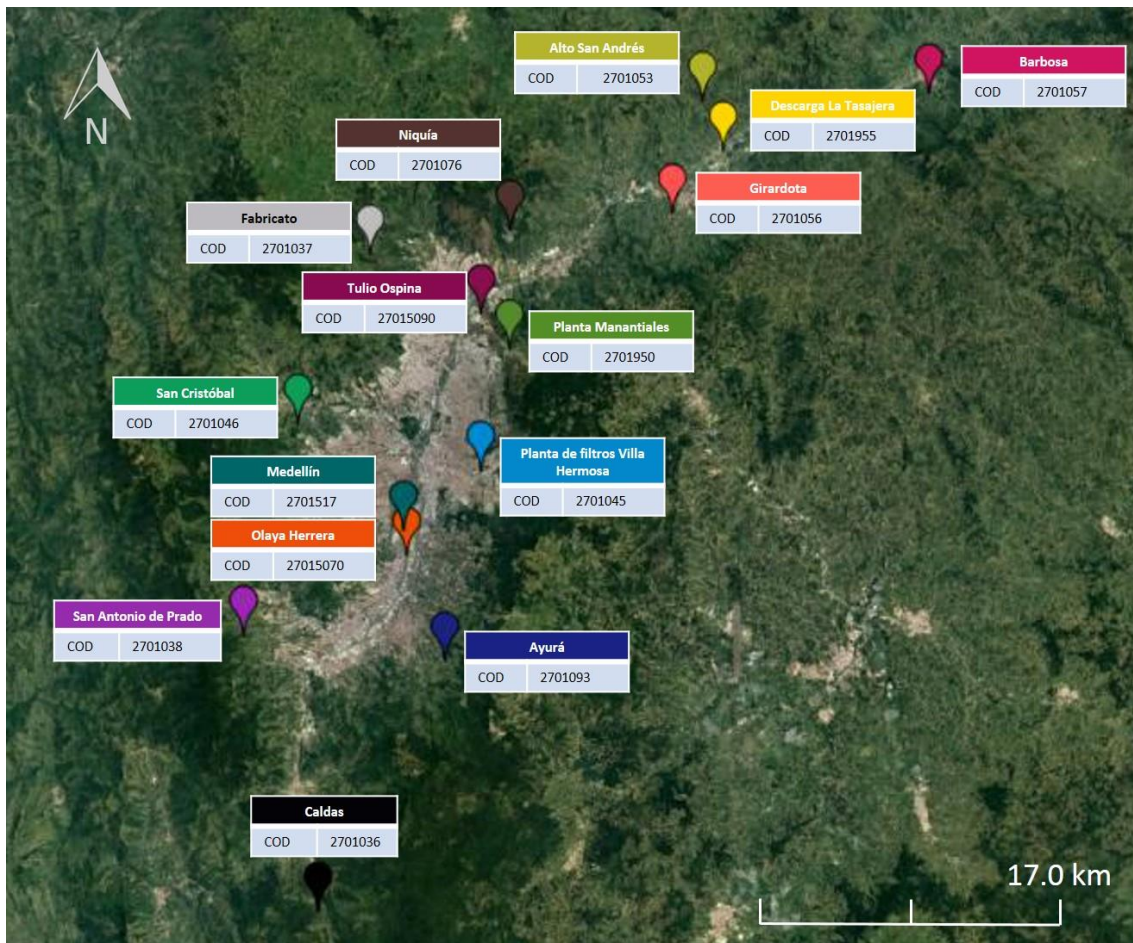
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

	1950	
--	------	--

*Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación de datos.*

La Figura 3 presenta la ubicación espacial en el Valle de Aburrá de las estaciones con registros de precipitación diaria.

**Figura 3.- Ubicación espacial de las estaciones con precipitación diaria procesadas.**



*Fuente: Imagen obtenida de Google Earth.*

Se obtuvieron, además, los registros de lluvia cada 15 minutos de 11 de las estaciones anteriormente mencionadas, todas ellas operadas por EPM (ver Tabla 2).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



**Tabla 2.- Registros obtenidos de precipitación cada 15 minutos.**

Código	Nombre de la estación	Hora y fecha de inicio de registros	Última hora y fecha con registros	Operador de la estación
2701036	Caldas	0:00 del 26 de agosto de 1949	0:00 del 1 de septiembre de 2009	EPM
2701038	San Antonio de Prado	0:00 del 29 de agosto de 1949	0:00 del 1 de septiembre de 2009	EPM
2701045	Planta de Filtros Villahermosa	0:00 del 8 de julio de 1948	0:00 del 1 de septiembre de 2009	EPM
2701046	San Cristóbal	0:00 del 22 de agosto de 1949	0:00 del 1 de septiembre de 2009	EPM
2701053	Alto San Andrés	0:00 del 1 de enero de 1959	0:00 del 1 de septiembre de 2009	EPM
2701056	Girardota	0:00 del 1 de enero de 1959	0:00 del 1 de septiembre de 2009	EPM
2701057	Barbosa	0:00 del 1 de enero de 1959	0:00 del 1 de septiembre de 2009	EPM
2701076	Niquía	0:00 del 2 de septiembre de 1984	0:00 del 1 de septiembre de 2009	EPM
2701093	Ayurá	0:00 del 28 de febrero de 1972	0:00 del 1 de septiembre de 2009	EPM
2701517	Medellín	0:00 del 1 de enero de 1954	0:00 del 1 de septiembre de 2009	EPM
2701950	Planta Manantiales	0:00 del 1 de julio de 1986	0:00 del 1 de septiembre de 2009	EPM

*Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación de datos. La información fue suministrada por la Ingeniera Alejandra Carmona de Conconcreto.*

Además, la ingeniera Alejandra Carmona, en representación de Conconcreto, compartió registros de bitácora de las interrupciones debidas a la lluvia de una de las construcciones de la empresa en el Valle de Aburrá, con un horizonte de registros de 6 meses, junto con información del avance de la obra que permitiera relacionar las interrupciones con la actividad de movimiento de tierras. Dichos registros, aunque no serán presentados en este trabajo de grado dada la confidencialidad de la empresa facilitadora de los mismos, serán analizados y sus resultados compartidos en el presente trabajo.

Por último, se recopilaron los resultados de simulación de varios modelos de circulación global: bcc-csm1-1-m, CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, GFDL-CM3, GISS-E2-H, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC5, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, y NorESM1-M. El horizonte retrospectivo de las herramientas exploradas está disponible para el período 1 de enero de 1942 al 31 de diciembre de 2005. La comparación entre los resultados de simulación y la información de las estaciones locales se llevó a cabo, sin embargo, para el horizonte retrospectivo 1 de enero de 1980 a 31 de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

diciembre de 2005. Con base en los registros de la estación con horizonte temporal más extenso (Olaya Herrera), se seleccionó el modelo con mejor desempeño (nombre de la herramienta). De manera complementaria, se recopilieron los resultados de simulaciones prospectivas de esta herramienta para el periodo comprendido entre el 1 de enero del 2015 y el 31 de diciembre del 2040.

## **2.2 CORRECCIÓN Y DEPURACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA**

Una vez obtenidos los requerimientos de información, se corrigieron los registros de precipitación de las estaciones operadas por EPM, ya que dichos datos no diferencian el registro de días secos (de precipitación diaria igual a 0 mm de lluvia) de los datos faltantes/vacíos de información (es decir, de los días sin toma de datos). En ambos casos, dichas estaciones presentan la información como celdas vacías.

Debido a esto, se optó por clasificar las celdas de la siguiente forma: cuando en los registros se encontró un mes o un período mayor con vacíos de información, se asumió que no se registraron datos, por lo que las celdas se trataron como información faltante. En el resto de los casos (cuando los vacíos de información no superaron el mes) se trataron dichos datos como si la precipitación de esos días hubiese sido 0 mm de lluvia.

Posteriormente, se procedió a verificar que la información recolectada no presentara incongruencias o valores espurios como por ejemplo precipitaciones negativas o valores no numéricos. Una vez fueron corregidos todos los datos de precipitación para los días secos y luego de haber identificado todas las carencias de información, se procedió a realizar un registro de las fechas con información faltante.

## **2.3 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LAS CONDICIONES DE LLUVIA EN EL VALLE DE ABURRÁ**

Una vez obtenida una base de información meteorológica confiable, se procedió a realizar una caracterización climática de las condiciones de lluvia en el Valle de Aburrá.

Se llevó a cabo un análisis multianual para caracterizar el comportamiento en el largo plazo de las siguientes cinco variables: la lámina de lluvia total anual, las láminas de lluvias totales trimestrales, las láminas de lluvias totales mensuales, la lámina de lluvia total diaria y la lámina de lluvia cada 15 minutos. Dada la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

disponibilidad de información, el análisis para las cuatro primeras variables mencionadas se llevó a cabo para todas las estaciones, mientras que el análisis para láminas de lluvia cada 15 minutos se realizó sólo para una de las estaciones.

### **2.3.1 Análisis multianual de la lámina de lluvia total anual**

Se recopilaron los datos de precipitación total anual multianual de cada una de las estaciones seleccionadas y se obtuvieron los histogramas de frecuencia de la lluvia total anual multianual para describir el comportamiento de la lluvia año a año en todas las estaciones.

### **2.3.2 Análisis multianual de las láminas de lluvias totales trimestrales**

Se repitió el procedimiento anterior para el análisis multianual de la precipitación total anual, pero en este caso se realizó con la lluvia total para periodos de tres meses que reflejan la variabilidad intra-anual estacional: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM), Junio-Julio-Agosto (JJA) y Septiembre-October-Noviembre (SON).

### **2.3.3 Análisis multianual de las láminas de lluvias totales mensuales**

Se obtuvo el valor medio de la precipitación por mes para graficar el comportamiento de la lluvia en un año, de tal manera que se grafique el ciclo anual de la lluvia en el Valle.

### **2.3.4 Análisis multianual de la lámina de lluvia total diaria**

El análisis multianual de la precipitación diaria en las estaciones del Valle de Aburrá permitió, además de obtener los histogramas de la distribución de la lluvia y sus medidas de tendencia central y percentiles, realizar un análisis de las transiciones entre estados de humedad, señales climáticas a diferentes escalas temporales y comparaciones con resultados de simulación de modelos de circulación global.

#### **○ Análisis de transiciones entre estados de humedad**

Para este análisis se planteó la siguiente clasificación para un día, según la lámina de lluvia diaria: si la lámina diaria registrada está entre 0 mm y 1 mm de lluvia, el día se categoriza como día seco (Dry). Si la lámina de lluvia diaria se encuentra entre 1 mm y el percentil 95° de lluvia de la estación, el día se categoriza como día húmedo (Wet). Por último, si la lámina iguala o excede la lámina asociada al percentil 95° de lluvia diaria de la estación, el día se categoriza como día súper húmedo (SWet).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Teniendo categorizados todos los días de registro de cada una de las estaciones, se hizo un conteo de la cantidad de transiciones entre una categoría y otra. Es decir, que si un día fue categorizado como Dry y el siguiente como Wet, se cuenta allí una transición de Dry a Wet (D-W). Este conteo permite la obtención de una matriz de transiciones en los datos de cada estación, conocidas como probabilidades de transición entre estados de humedad consecutivos (en adelante, matrices de Joint Probability). Las matrices mencionadas tienen la forma que se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.- Ejemplo de la matriz de Joint Probability**

	Dry	Wet	SWet
Dry	$p(D-D)$	$p(D-W)$	$p(D-SW)$
Wet	$p(W-D)$	$p(W-W)$	$p(W-SW)$
SWet	$p(SW-D)$	$p(SW-W)$	$p(SW-SW)$

*Fuente: Construcción Propia.*

Además de realizar la matriz de Joint Probability para la totalidad de los datos, se realizan las mismas pero discriminadas por mes, con el fin de encontrar las probabilidades de transiciones entre estados de humedad a escala mensual. Este procedimiento, y los subsiguientes se realizaron sólo para la estación Olaya Herrera, ya que de las 15 estaciones disponibles la estación del aeropuerto Olaya Herrera es la que posee el horizonte temporal de registros más extenso (74 años).

Luego se realizan una vez más las matrices de Joint Probability, pero año a año. Con esto se consigue describir el comportamiento de las transiciones a lo largo del tiempo (comportamiento año a año) y, además, permite agrupar transiciones para evaluar una posible tendencia creciente o decreciente de obtener probabilidades de transición a estados lluviosos (D-W, D-SW, W-W, W-SW, SW-W, SW-SW) los cuales, eventualmente, llevarían a la suspensión de las actividades en una obra de construcción. Dichas probabilidades son sumadas y ubicadas en una gráfica junto con su regresión lineal contra el año de interés, de manera que permitan conocer si, a un nivel de significancia del 5%, las transiciones a estados húmedos o súper húmedos tienen tendencias crecientes o decrecientes estadísticamente significativas.

Las probabilidades de las transiciones que eventualmente llevarían a la suspensión de la ejecución de actividades en obra se obtienen al sumar las

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

probabilidades de transiciones Dry-Wet, Dry-SWet, Wet-Wet, Wet-SWet, SWet-Wet, SWet-SWet.

Además de la elaboración de las matrices de Joint Probability, la información a escala diaria de las estaciones permitió analizar la duración de las rachas de días consecutivos con categoría Wet o SWet. De estas rachas se puede obtener la máxima racha de días húmedos y súper húmedos consecutivos en cada año. Se ajustan tendencias lineales en el largo plazo a las series de rachas máximas por año y se evalúa la significancia estadística de las tendencias crecientes o decrecientes observadas.

#### ○ **Análisis de señales climáticas**

El análisis de señales climáticas se lleva a cabo con los datos de precipitación total anual y trimestral. En ambos casos se encuentran las anomalías de precipitación año a año, cuantificadas como la diferencia entre el valor de la precipitación de cada año y el promedio de precipitación multianual. Las anomalías indican la dispersión de los datos con respecto a la media. Anomalías negativas indican que la lámina de precipitación de ese año fue menor que el promedio multianual de largo plazo, mientras que anomalías positivas sugieren que la lámina de precipitación excedió la media multianual.

Se exploran las señales de variabilidad climática para diferentes escalas temporales utilizando promedios móviles en las series anuales de anomalías. Las señales incluyeron la Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO, asumiendo una recurrencia promedio de 60 años), la Pacific Decadal Oscillation (PDO, asumiendo una recurrencia promedio de 22 años), la escala interdecadal asociada a las manchas solares (asumiendo un intervalo de recurrencia de 12 años), el fenómeno El Niño-Southern Oscillation (ENSO, utilizando un promedio móvil de 4 años), y la Quasi-Biennial Oscillation (QBO, asumiendo 2 años de intervalo de recurrencia promedio).

#### ○ **Análisis con modelos de precipitación global**

La lista de modelos de circulación global mencionada anteriormente (bcc-csm1-1-m, CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, GFDL-CM3, GISS-E2-H, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC5, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, y NorESM1-M) se redujo a la lista corta de herramientas con buen desempeño para el contexto de la región estudio. Los cuatro modelos de circulación global que se incluyeron en esta lista corta incluyeron: el GISS-E2-R, el MRI-CGCM3, el MPI-ESM-MR, y el bcc-csm1-1-m.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Los resultados de simulaciones retrospectivas de estos cuatro modelos se compararon con los registros observados para el período histórico comprendido entre el 1 de enero de 1980 y el 31 de diciembre del 2005.

La comparación se llevó a cabo entre las probabilidades de transición entre estados de humedad, ya que de esta forma se puede evaluar el ajuste de los modelos. Esta aproximación no permite evaluar si el modelo predice con exactitud la lámina de lluvia de un día determinado, pero sí permite analizar si el modelo predice de manera acertada la cantidad de días lluviosos o cuantas transiciones de cada tipo existen en un año determinado.

De esta forma, se encontraron las matrices de Joint Probability año a año para los datos de las estaciones en tierra y para los cuatro modelos. Como en el análisis de transición entre estados de humedad, se calcularon las probabilidades de tener transiciones a estados húmedo o súper húmedo para ambos casos (modelos y datos de las estaciones). Se calculó posteriormente el error año a año entre la probabilidad de cada uno de los modelos y la de los datos reales, y se cuantificó el error medio para transiciones a condiciones húmedas o súper húmedas, de tal manera que se identifique el modelo que presenta un menor error medio para este tipo de condiciones. La herramienta finalmente seleccionada puede ser utilizada para proyecciones para el horizonte prospectivo 1 de enero de 2015 a 31 de diciembre de 2040. Con este ejercicio, se hace una primera aproximación a las posibles condiciones climáticas futuras en el Valle de Aburrá bajo, específicamente, el estado climático de la tierra considerando un desbalance

radiativo de  $+8.5 \frac{W}{m^2}$  (en adelante, RCP 8.5).

### **2.3.5 Análisis multianual de las láminas de lluvia totales cada 15 minutos.**

El periodo de información confiable para el análisis de las láminas de lluvia cada 15 minutos es el comprendido entre la hora 0:00 del 1 de enero del 2001 y la hora 0:00 del 1 de septiembre del 2009, pues los registros de periodos anteriores presentan la lámina de lluvia cada 15 minutos uniformemente distribuida en la duración total de la lluvia, por lo que no representa información confiable para el desarrollo de este trabajo. El análisis sólo se realizará para una de las estaciones disponibles: la estación 2701045 Planta de Filtros Villahermosa.

Se seleccionan los 15 minutos más lluviosos de cada mes de los 8 años de registro. Se ubican en una gráfica de burbujas los valores de lámina de lluvia máxima de 15 minutos obtenidos para cada mes, relacionando la hora de ocurrencia para identificar el momento en que suelen ocurrir los máximos eventos de lluvia de tal duración. Este procedimiento se repite para la lluvia máxima de 15

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

minutos por mes, de manera multianual, es decir, la máxima de todos los eneros, la máxima de todos los febreros, y así sucesivamente.

Se encuentran los 15 minutos más lluviosos de cada día para todos los meses en los 8 años de registros de información confiable (2001 – 2009). Posteriormente, se cuenta cuántas veces la lámina de lluvia máxima del día cae en cada una de las 24 horas para encontrar la probabilidad de que la lámina máxima de lluvia de 15 minutos de duración ocurra en determinada hora del día, dependiendo del mes que se analice.

Teniendo estas probabilidades, se pueden ubicar en una matriz como la que se muestra en la Tabla 4, para encontrar las horas del día, según el mes que se analice, en las que sea más probable tener eventos de lámina de lluvia máxima de 15 minutos de duración.

**Tabla 4.- Ejemplo de matriz de probabilidades de precipitación máxima en 15 minutos según hora del día y mes del año.**

Hora/Mes	Enero	Febrero	...	Nov	Dic
0	p(Rmáx15min, Ene, 0)	p(Rmáx15min, Feb, 0)	...	p(Rmáx15min, Nov, 0)	p(Rmáx15min, Dic, 0)
1	p(Rmáx15min, Ene, 1)	p(Rmáx15min, Feb, 1)	...	p(Rmáx15min, Nov, 1)	p(Rmáx15min, Dic, 1)
...	...	...	...	...	...
22	p(Rmáx15min, Ene, 22)	p(Rmáx15min, Feb, 22)	...	p(Rmáx15min, Nov, 22)	p(Rmáx15min, Dic, 22)
23	p(Rmáx15min, Ene, 23)	p(Rmáx15min, Feb, 23)	...	p(Rmáx15min, Nov, 23)	p(Rmáx15min, Dic, 23)

*Fuente: Elaboración propia.*

Además, se obtuvo la matriz de probabilidades de eventos máximos de lluvia en 15 minutos de duración restringido a un horario laboral típico de las construcciones en Colombia, es decir desde las 7 AM hasta las 5 PM para todos los meses del año (ver Tabla 5). Es en este horario laboral en el que la lluvia puede afectar el desarrollo de las actividades de construcción.

**Tabla 5.- Ejemplo de matriz de probabilidades de precipitación máxima en 15 minutos según hora del día y mes del año para un horario laboral.**

Hora/Mes	Enero	Febrero	...	Nov	Dic
7	p(Rmáx15min, Ene, 7)	p(Rmáx15min, Feb, 7)	...	p(Rmáx15min, Nov, 7)	p(Rmáx15min, Dic, 7)
8	p(Rmáx15min, Ene, 8)	p(Rmáx15min, Feb, 8)	...	p(Rmáx15min, Nov, 8)	p(Rmáx15min, Dic, 8)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

	Ene, 8)	Feb, 8)		Nov, 8)	Dic, 8)
...	...	...	...	...	...
16	p(Rmáx15min, Ene, 16)	p(Rmáx15min, Feb, 16)	...	p(Rmáx15min, Nov, 16)	p(Rmáx15min, Dic, 16)
17	p(Rmáx15min, Ene, 17)	p(Rmáx15min, Feb, 17)	...	p(Rmáx15min, Nov, 17)	p(Rmáx15min, Dic, 17)

*Fuente: Elaboración propia.*

## 2.4 DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE LLUVIA PARA LA INTERRUPCIÓN DEL MOVIMIENTO DE TIERRAS

Para la determinación del umbral de lámina de lluvia total en un día que lleva a una eventual interrupción de las actividades de movimiento de tierras en la construcción, es necesario poseer información de los registros de interrupción en obra de dichas actividades debido a la lluvia, de manera que sea posible encontrar tal umbral en los registros históricos de estaciones pluviométricas y pluviográficas del sector

Para esto, como se indica en el numeral 2.1, se recolectó información de la suspensión de actividades en una construcción de la empresa Conconcreto, junto con la información del avance de la obra para dichas fechas. Esta información permitió encontrar diferentes láminas de lluvia que generaron que las actividades de construcción fueron detenidas. Se utilizaron los valores mínimos de las láminas de lluvia asociadas a la interrupción de las labores en obra (de todas las reportadas), para encontrar efectivamente el umbral de lluvia a partir del cual se detiene la actividad de movimiento de tierras.

El umbral de lámina de lluvia total diaria se introdujo en la gráfica de porcentaje acumulado de la lluvia total diaria para la estación con el horizonte de registros más extenso. De esta forma se encontró el percentil de la lluvia total diaria que suspende la actividad de movimiento de tierras en la construcción.

Posteriormente se evalúa mes a mes y en cada trimestre, cuál es la probabilidad de tener al menos un día con lámina de lluvia superior al umbral, lo que llevaría a una suspensión en obra si el evento ocurre dentro de un horario laboral. Esto se logró obteniendo las gráficas de lámina de lluvia acumulada y encontrando allí el percentil asociado a la lámina de lluvia umbral. La probabilidad de tener al menos un día con lámina de lluvia superior al umbral de suspensión, fue calculada como la diferencia entre el 100% y el porcentaje asociado al percentil del umbral.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## **2.5 DETERMINACIÓN DEL TIEMPOS DE EXTENSIÓN PARA MOVIMIENTO DE TIERRAS**

Para determinar la probabilidad de tener suspensiones en la actividad de movimientos de tierra debido a láminas de lluvia superiores al umbral de interrupción presentadas dentro de un horario laboral, se analizan los siguientes eventos estadísticos:

Evento A: se presenta una lámina de alta intensidad de 15 minutos de duración en un horario laboral (7 AM - 5 PM) en el mes de interés.

Evento B: se presenta una lámina de lluvia diaria mayor al umbral de interrupción en el mes de interés.

La probabilidad de ocurrencia del evento A (en adelante  $p(A)$ ) se obtiene de la suma, para cada mes, de las probabilidades de obtener un evento de precipitación máximo entre las 7 AM y las 5 PM en el horizonte confiable de datos de una de las estaciones con información de lámina de lluvia cada 15 minutos.

La probabilidad de ocurrencia del evento B (en adelante  $p(B)$ ) se obtuvo como el cociente entre la cantidad de días con lámina de lluvia superior al umbral de interrupción y la cantidad total de días analizados, para una de las estaciones con registros de lluvia diarios. Es importante aclarar que el horizonte temporal y la estación sobre la que se trabajó para encontrar las probabilidades  $p(A)$  y  $p(B)$  es el mismo.

La probabilidad condicional de A dado B (en adelante  $p(A|B)$ ), que denota la probabilidad que una lámina de lluvia superior a la del umbral se haya presentado en un horario laboral dado que en el día la lámina total superó dicho umbral, se obtuvo mes a mes como el cociente entre los días en los que la lámina total de lluvia registrada dentro del horario laboral fue superior al umbral de suspensión, y el número de días totales en los que la lámina de lluvia total diaria fue superior al umbral.

La probabilidad que en un día ocurra un evento máximo de lluvia de 15 minutos de duración que supere el umbral de suspensión y que se presente en un horario laboral, es decir la probabilidad de eventos A y B (en adelante  $p(A \cap B)$ ), se obtuvo como el producto entre  $p(A|B)$  y  $p(B)$ .

Finalmente se encuentra la probabilidad de obtener días consecutivos con lámina superior al umbral definido para cada mes en todos los años de registro con la información de la estación Olaya Herrera.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La lectura conjunta de la gráfica de  $p(A \cap B)$  y la de la probabilidad de tener días consecutivos con lámina superior a la del umbral permite entonces tener una aproximación, en términos de probabilidad, al tiempo de extensión que requerirá una obra para su movimiento de tierras debido a la lluvia en el Valle de Aburrá, según el momento de ejecución en un año característico.

## **2.6 VALIDACIÓN DE LOS UMBRALES PROPUESTOS MEDIANTE COMPARACIÓN CON UN CASO REAL**

La validación de la propuesta de extensión de tiempo, expresada en probabilidades de suspensión del movimiento de tierras asociada con su recurrencia en un mes, debido a la ocurrencia de lluvias con láminas superiores al umbral determinado, no fue desarrollada debido a que, durante el desarrollo del presente trabajo, no se contó con información de suspensión del movimiento de tierras en alguna obra del Valle de Aburrá diferente a la utilizada para la determinación del umbral. Esto se debe a que los únicos registros que la empresa facilitadora de información (Concreto) pudo suministrar, fueron utilizados para la determinación de los umbrales, por lo que no fue posible validar con algún caso externo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### 3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este numeral se expondrán los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología expuesta en el numeral 2 del presente trabajo.

Es importante aclarar que, debido a la gran cantidad de información procesada, los resultados presentados en este numeral serán solo una parte o ejemplo del total de resultados obtenidos. Información más detallada está almacenada en los archivos digitales de soporte de este trabajo, y puede ser suministrada a las partes interesadas una vez se reciban las respectivas solicitudes.

#### 3.1 RESULTADOS DE LA CORRECCIÓN Y DEPURACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA

La Ilustración 1 muestra un ejemplo de la corrección para días secos y datos faltantes que se llevó a cabo para los registros del año 2010 de la estación 2701076 Niquía.

En dicha ilustración se puede apreciar en la base de datos original (parte izquierda de la ilustración) existen algunas casillas vacías que, como se indicó en la metodología, fueron corregidas agregando 0.0 para los casos considerados como días secos o de precipitación nula, o con el identificador “NaN” para la información considerada faltante (parte derecha de la ilustración).

La Tabla 6 presenta un resumen de la información identificada como faltante.

**Tabla 6.- Registros diarios de precipitación faltante.**

Estación	Año	¿Qué falta?
2701037	1993	Medio febrero y marzo
2701037	1998	Noviembre y casi todo diciembre
2701046	2010	Mayo
2701053	1959	9 días de enero
2701053	1996	9 de mayo
2701053	1998	Marzo
2701053	1999	Febrero
2701056	1959	11 días de enero y todo

Estación	Año	¿Qué falta?
		febrero
2701056	1961	Enero y febrero
2701056	1986	Todo el año
2701056	2012	26 de enero y 12 de mayo
2701057	1959	9 días de enero
2701057	1964	Enero , febrero y marzo
2701076	1984	Casi todo el año
2701076	2003	Octubre
2701076	2009	Septiembre

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Estación	Año	¿Qué falta?
2701076	2010	Noviembre y diciembre
2701076	2011	Enero, febrero, marzo, abril y mayo
2701076	2012	Diciembre
2701093	1972	Enero y febrero
2701093	1994	Septiembre
2701093	2009	17 de septiembre
2701093	2011	Agosto y septiembre
2701517	1954	Medio año
2701517	1996	30 de septiembre
2701517	1999	Julio, agosto y septiembre
2701517	2000	15 de diciembre
2701517	2003	29 de abril
2701517	2007	22 de agosto
2701950	1986	Medio año
2701950	1992	Febrero y marzo
2701950	1995	13 de diciembre
2701950	2000	Diciembre
2701950	2001	Todo el año
2701950	2002	Todo el año
2701950	2003	Todo el año
2701950	2004	Todo el año
2701950	2005	Todo el año
2701950	2006	Todo el año
2701950	2007	Todo el año
2701950	2008	Todo el año
2701950	2009	Todo el año
2701950	2010	Todo el año
2701950	2011	Todo el año
2701950	2012	Todo el año
2701955	1984	De enero a agosto
2701955	1989	Diciembre
2701955	1997	De abril a diciembre

Estación	Año	¿Qué falta?
2701955	1998	Todo el año
2701955	1999	Todo el año
2701955	2000	Todo el año
2701955	2001	Todo el año
27015070	1960	Todo el año
27015070	1966	Mayo
27015070	1977	Diciembre
27015070	1979	Todo el año
27015070	1980	Todo el año
27015070	1987	Enero, febrero, marzo, abril, mayo y medio junio
27015070	1988	14 de diciembre
27015070	2016	Agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre
27015090	1950	De enero a agosto
27015090	1951	Agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre
27015090	1952	De enero a agosto
27015090	1962	De enero a abril y de septiembre a diciembre
27015090	1963	Todo el año
27015090	1964	Todo el año
27015090	1965	Todo el año
27015090	1966	Todo el año
27015090	1967	Todo el año
27015090	1968	Enero, febrero, marzo, abril y mayo
27015090	1969	Septiembre y octubre
27015090	1970	De enero a septiembre
27015090	1979	Agosto y septiembre
27015090	1980	Septiembre y noviembre
27015090	1995	Agosto y septiembre
27015090	1998	Octubre, noviembre y diciembre

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Estación	Año	¿Qué falta?
27015090	1999	Enero y medio febrero
27015090	2005	5 días de diciembre
27015090	2007	12 días de enero
27015090	2009	10 días de diciembre
27015090	2010	12 días de enero y 6 de

Estación	Año	¿Qué falta?
		diciembre
27015090	2011	11 días de enero

*Fuente: Elaboración propia.*

### Ilustración 1.- Ejemplo de corrección para días de sin precipitación y datos faltantes.

Estación 2701076 (Niquia)												
Base de datos original (sin modificaciones)												
2010												
Day	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1				0.8		8.9		7.9	1.3	12.2		
2			0.8	19.2		55.7	3.6	5.9	7.7	3.3		
3			11.4	1.6	1.0	10.4	11.2	10.4	11.6	2.2		
4				11.4	13.2		5.3	13.0	3.6	32.3		
5			1.5	4.3	2.5		4.8		5.6	18.4		
6				3.8	17.8		3.1	1.3	11.9	20.7		
7				6.1	1.0			0.3	10.2	0.3		
8	3.8			0.3	8.6	3.8	3.8	2.3	9.9	15.0		
9	2.3			13.0	4.6	16.0	5.3	2.5	10.2	2.3		
10				0.3	3.1	11.4	7.9					
11		0.3	3.0	0.3	19.4	8.9	9.7		14.7			
12		0.5			2.4	13.2	0.3	32.0	1.3			
13				20.1	12.8	13.6	0.3	4.8	8.6			
14		0.3		0.3	9.3	16.1	16.0		1.5	0.3		
15		0.3				2.5	14.7	9.6	1.5			
16				14.7		31.8	19.8	11.9	9.7	14.7		
17			9.1			1.0	4.1	0.5	6.4	2.0		
18	1.5			3.6	2.3	2.8	2.5	6.9	0.3			
19			0.5	1.0	17.3	20.7		5.6	19.6			
20					24.8	3.7	34.0	3.6	4.8			
21			2.3		7.2	3.3	17.8		18.6			
22					1.5	9.1		0.3	9.7			
23		5.1			2.0	19.7	0.8		5.3			
24		1.5		4.1	6.9	22.3	13.0	6.0	6.1			
25		7.9		2.8	12.4	5.9		9.3	45.0			
26		3.3	1.0	3.8	5.9	4.0	11.9	1.3	13.2			
27			4.8	4.1	9.9	17.0	2.0	15.2	10.4			
28			0.3	12.4		9.2	4.3	17.1	2.3			
29	56.6			2.0	2.3		1.0	9.2	4.1			
30	0.3		3.3			0.3	7.1		1.5			
31			3.3		16.3		0.8	12.7				

Base de datos modificada												
2010												
Day	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	8.9	0.0	7.9	1.3	12.2	NaN	NaN
2	0.0	0.0	0.8	19.2	0.0	55.7	3.6	5.9	7.7	3.3	NaN	NaN
3	0.0	0.0	11.4	1.6	1.0	10.4	11.2	10.4	11.6	2.2	NaN	NaN
4	0.0	0.0	0.0	11.4	13.2	0.0	5.3	13.0	3.6	32.3	NaN	NaN
5	0.0	0.0	1.5	4.3	2.5	0.0	4.8	0.0	5.6	18.4	NaN	NaN
6	0.0	0.0	0.0	3.8	17.8	0.0	3.1	1.3	11.9	20.7	NaN	NaN
7	0.0	0.0	0.0	6.1	1.0	0.0	0.0	0.3	10.2	0.3	NaN	NaN
8	3.8	0.0	0.0	0.3	8.6	3.8	3.8	2.3	9.9	15.0	NaN	NaN
9	2.3	0.0	0.0	13.0	4.6	16.0	5.3	2.5	10.2	2.3	NaN	NaN
10	0.0	0.0	0.0	0.3	3.1	11.4	7.9	0.0	0.0	0.0	NaN	NaN
11	0.0	0.3	3.0	0.3	19.4	8.9	9.7	0.0	14.7	0.0	NaN	NaN
12	0.0	0.5	0.0	0.0	2.4	13.2	0.3	32.0	1.3	0.0	NaN	NaN
13	0.0	0.0	0.0	20.1	12.8	13.6	0.3	4.8	8.6	0.0	NaN	NaN
14	0.0	0.3	0.0	0.3	9.3	16.1	16.0	0.0	1.5	0.3	NaN	NaN
15	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	2.5	14.7	9.6	1.5	0.0	NaN	NaN
16	0.0	0.0	0.0	14.7	0.0	31.8	19.8	11.9	9.7	14.7	NaN	NaN
17	0.0	0.0	9.1	0.0	0.0	1.0	4.1	0.5	6.4	2.0	NaN	NaN
18	1.5	0.0	0.0	3.6	2.3	2.8	2.5	6.9	0.3	0.0	NaN	NaN
19	0.0	0.0	0.5	1.0	17.3	20.7	0.0	5.6	19.6	0.0	NaN	NaN
20	0.0	0.0	0.0	0.0	24.8	3.7	34.0	3.6	4.8	0.0	NaN	NaN
21	0.0	0.0	2.3	0.0	7.2	3.3	17.8	0.0	18.6	0.0	NaN	NaN
22	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	9.1	0.0	0.3	9.7	0.0	NaN	NaN
23	0.0	5.1	0.0	0.0	2.0	19.7	0.8	0.0	5.3	0.0	NaN	NaN
24	0.0	1.5	0.0	4.1	6.9	22.3	13.0	6.0	6.1	0.0	NaN	NaN
25	0.0	7.9	0.0	2.8	12.4	5.9	0.0	9.3	45.0	0.0	NaN	NaN
26	0.0	3.3	1.0	3.8	5.9	4.0	11.9	1.3	13.2	0.0	NaN	NaN
27	0.0	0.0	4.8	4.1	9.9	17.0	2.0	15.2	10.4	0.0	NaN	NaN
28	0.0	0.0	0.3	12.4	0.0	9.2	4.3	17.1	2.3	0.0	NaN	NaN
29	56.6		0.0	2.0	2.3	0.0	1.0	9.2	4.1	0.0	NaN	NaN
30	0.3		3.3	0.0	0.0	0.3	7.1	0.0	1.5	0.0	NaN	NaN
31	0.0		3.3		16.3		0.8	12.7		0.0	NaN	NaN

*Fuente: Elaboración propia.*

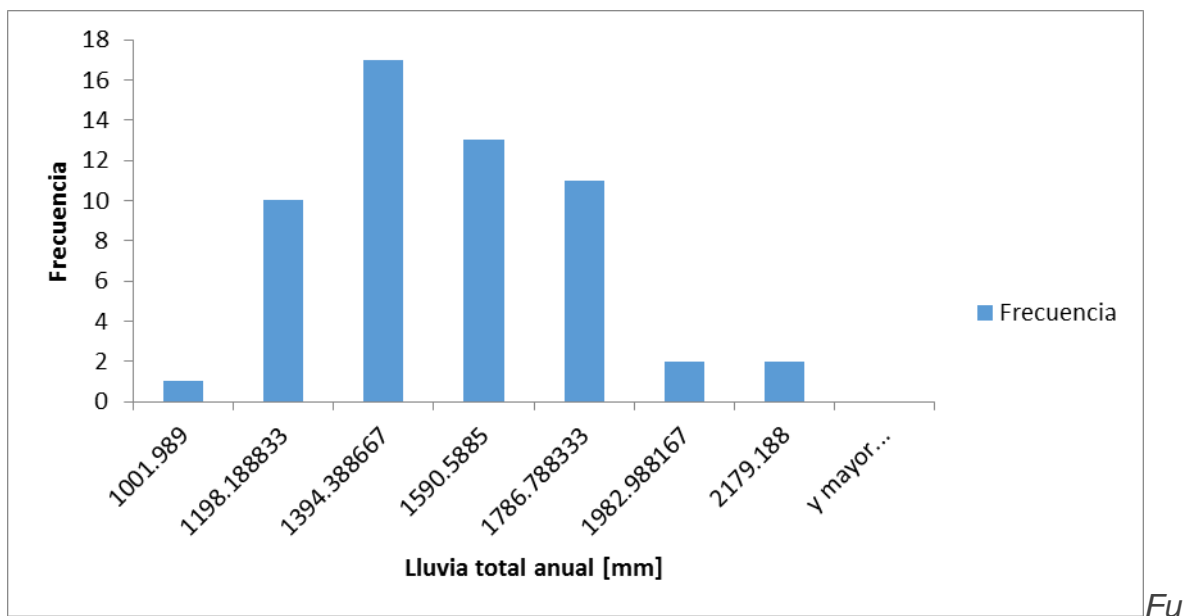
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## 3.2 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LAS CONDICIONES DE LLUVIA EN EL VALLE DE ABURRÁ

### 3.2.1 Resultados del análisis de las láminas de lluvia totales anuales multianuales

Un ejemplo de los histogramas de precipitación total anual multianual, para el caso de la estación de código 2701517 Medellín, se presenta en la Gráfica 3. Este resultado muestra que en la estación Medellín en promedio se registran láminas de lluvia total anual cercanas a los 1400 mm y que las láminas de lluvia mínima y máxima en un año registradas en el periodo 1955 – 2012 ascienden a 1002 mm y 2180 mm, respectivamente.

**Gráfica 3.- Histograma de la lámina de lluvia total anual para la estación Medellín.**



ente: Elaboración propia.

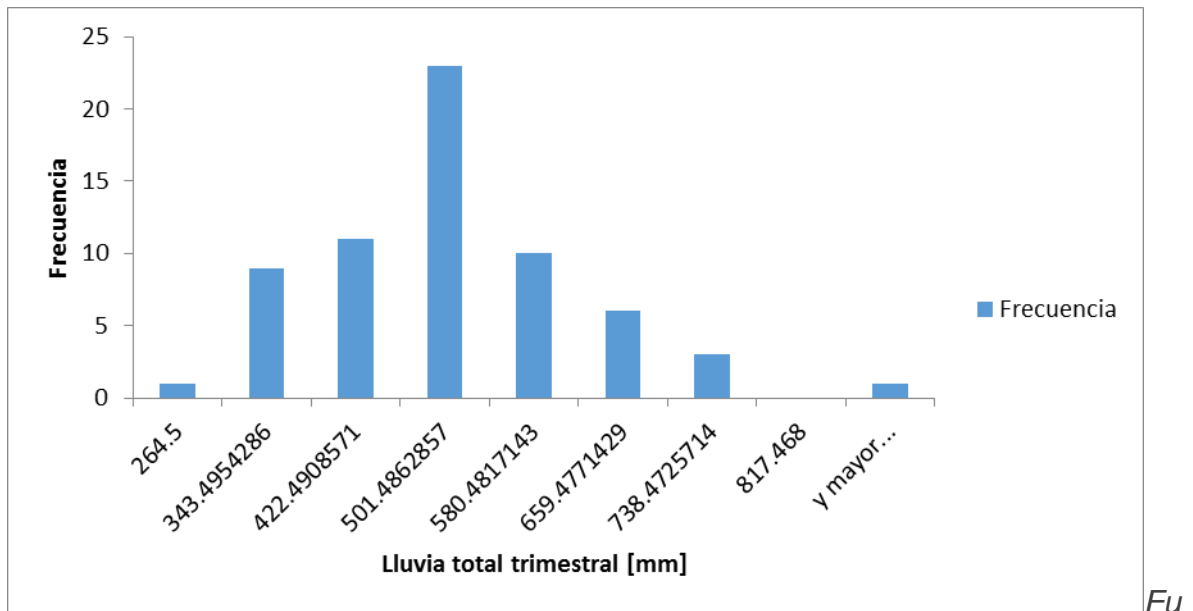
### 3.2.2 Resultados del análisis de las láminas de lluvia totales trimestrales multianuales

Un ejemplo de los histogramas de las láminas de lluvia totales trimestrales se muestra en la Gráfica 4, para el caso de la lluvia total en el periodo Mar-Abr-May de la estación 2701045 Planta de Filtros Villahermosa. De este análisis se puede

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

encontrar que la historia de registros muestra que para el trimestre de interés, en la estación 2701045 se presentaron en promedio láminas de lluvia totales de aproximadamente 500 mm de lluvia, con láminas mínima y máxima de 264 mm y 817 mm de lluvia, respectivamente.

**Gráfica 4.- Histograma de la lámina de lluvia total en el Marzo-Abril-Mayo para la estación Planta de Filtros Villahermosa.**



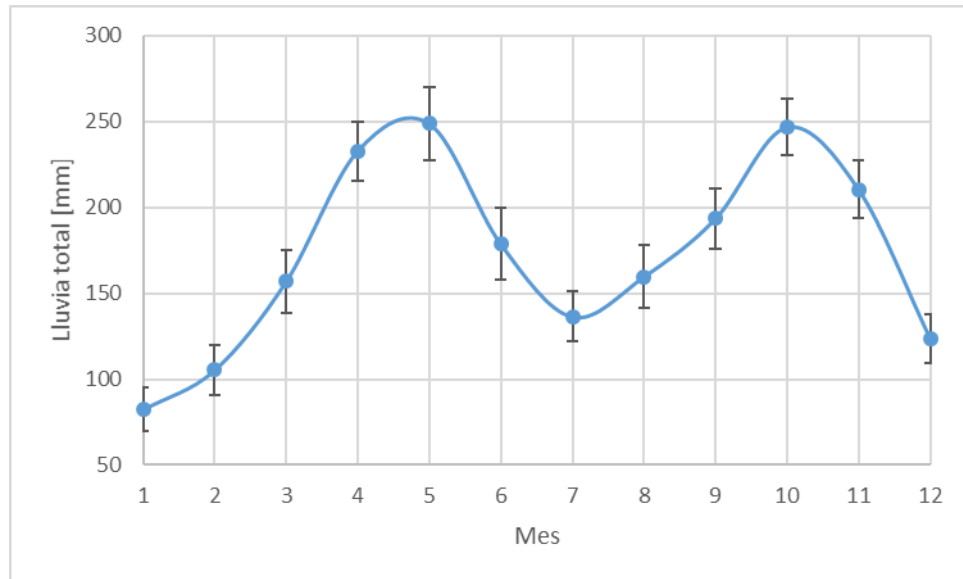
ente: Elaboración propia.

### 3.2.3 Resultados del análisis multianual de las láminas de lluvia totales mensuales

La lluvia total mensual en el Valle de Aburrá se distribuye de manera bimodal en un año normal, teniendo dos periodos de alta precipitación (en los trimestres de marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre) y dos periodos de baja lámina de lluvia (en los trimestres junio-julio-agosto y diciembre-enero-febrero). Un ejemplo de este ciclo anual normal, para la estación 2701038 San Antonio de Prado, puede observarse en la Gráfica 5, en donde se presenta además un intervalo de confianza por mes, con un nivel de significancia del 5%. Allí se puede apreciar que, en promedio, las máximas láminas de lluvia totales mensuales en el año son del orden de 250 mm (ocurren en los meses de mayo y octubre), y que las mínimas alcanzan los 80 mm de lluvia por mes, específicamente en el mes de enero.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Gráfica 5.- Distribución de la lluvia total mensual en un año para la estación San Antonio de Prado.**



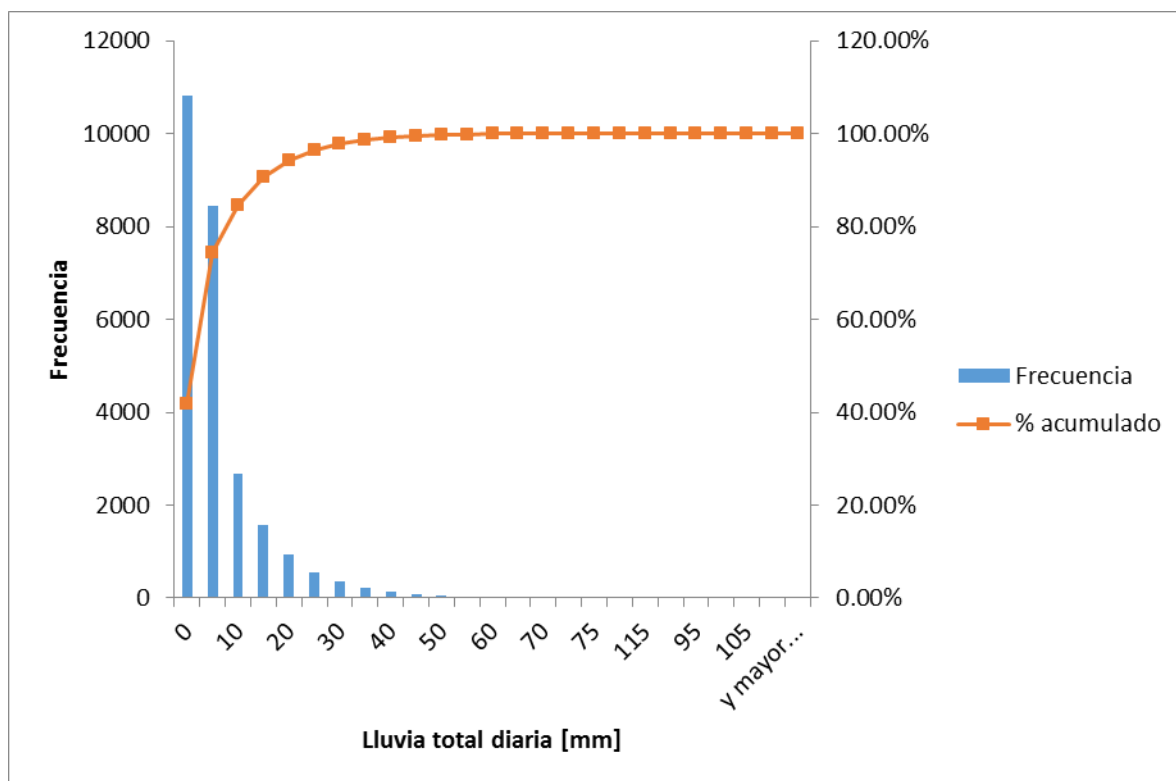
*Fuente: Elaboración propia.*

#### **3.2.4 Resultados del análisis multianual de la lámina de lluvia total diaria**

Así como en los anteriores análisis, en la caracterización de la lluvia total diaria también se obtienen histogramas de distribución de la precipitación diaria para todas las estaciones. En la Gráfica 6 se puede apreciar el histograma asociado a la lluvia total diaria de la estación de código 2701037 Fabricato.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Gráfica 6.- Histograma de lámina de lluvia total diaria para la estación Olaya Herrera.**

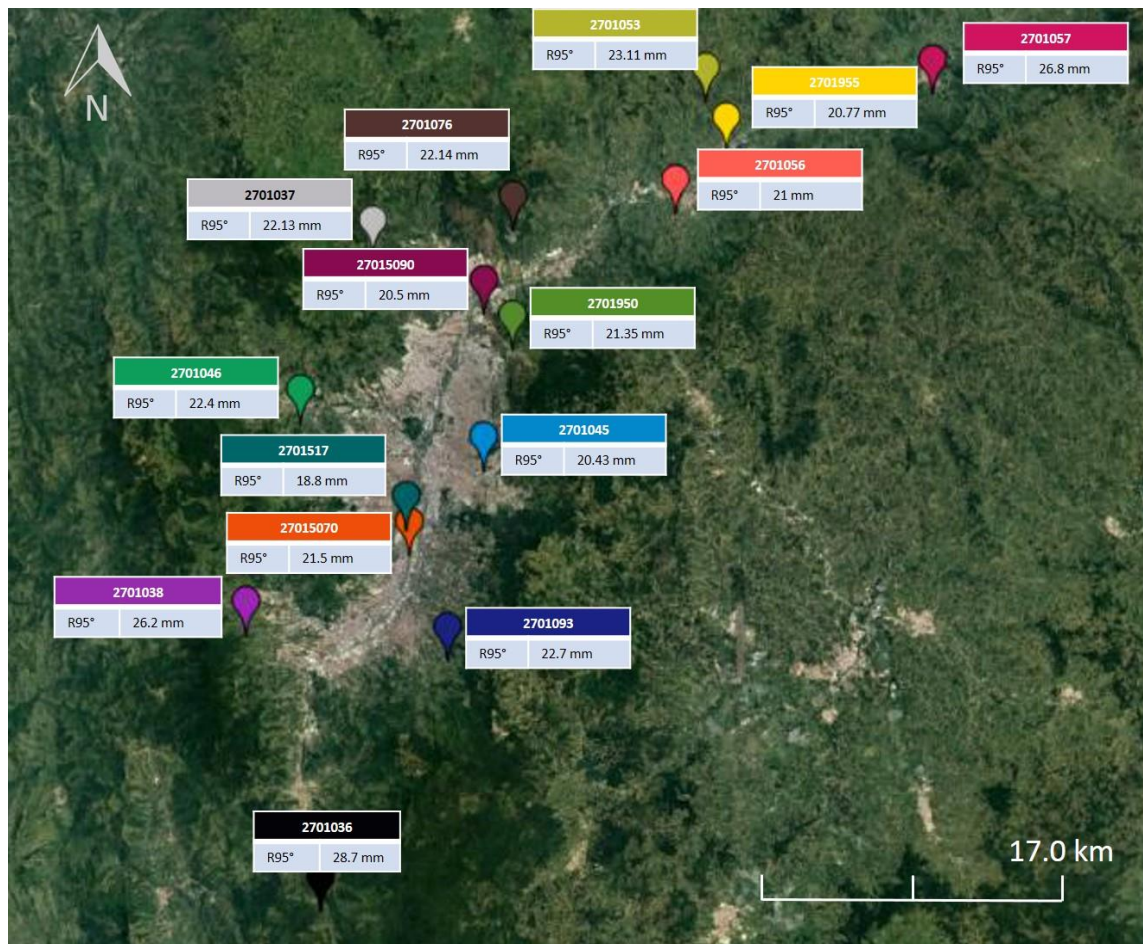


*Fuente: Elaboración propia.*

Además de los histogramas, se obtuvo el percentil 95° para cada una de las estaciones con el fin de categorizar los días según su estado de humedad. La Figura 4 muestra la distribución espacial del percentil 95° de las estaciones del Valle de Aburrá.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Figura 4.- Percentil 95° de lluvia total diaria para las estaciones del Valle de Aburrá**



*Fuente: Imagen obtenida de Google Earth. Datos de elaboración propia.*

#### ○ **Resultados del análisis de transiciones entre estados de humedad**

Luego de categorizar los días según su lámina de lluvia, se construyeron las matrices de Joint Probability. Un ejemplo de tales matrices se muestra en la Tabla 7, en donde se presenta la matriz de la estación 27015070 Olaya Herrera. Los datos sugieren que las probabilidades de transiciones día seco-a-día seco, día seco-a-día húmedo y día seco-a-día súper húmedo ascienden a 35.7%, 16.1% y 1.7%, respectivamente.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

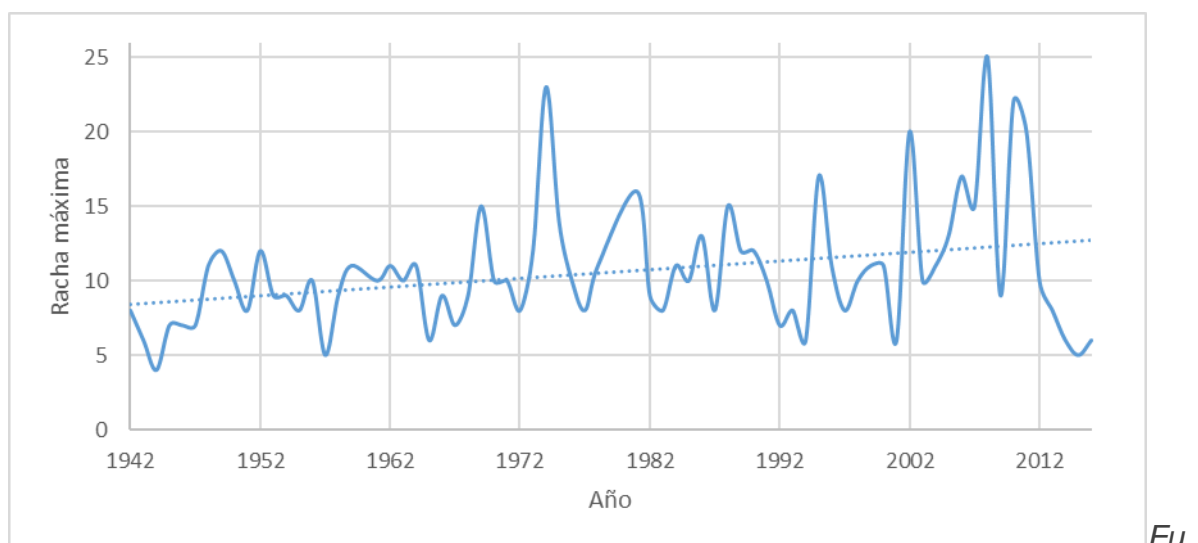
**Tabla 7.- Matriz de probabilidad conjunta para transiciones entre estados de humedad para la estación Olaya Herrera.**

	Dry	Wet	SWet
Dry	35.65%	16.14%	1.66%
Wet	16.21%	22.43%	2.92%
SWet	1.57%	3.01%	0.41%

*Fuente: Elaboración propia.*

Al realizar un análisis estadístico de la regresión lineal de las rachas de días lluviosos consecutivos máximas anuales, se obtiene que existe una tendencia creciente estadísticamente significativa ( $p = 0.0086$ ) a un nivel de significancia del 5%. La Gráfica 7 muestra el comportamiento de las rachas máximas en la historia de registros de la estación 27015070 Olaya Herrera.

**Gráfica 7.- Rachas máximas de días lluviosos continuos por año en la estación Olaya Herrera.**



*Fuente: Elaboración propia.*

La Tabla 8 presenta un resumen de los resultados de la elaboración de las matrices de Joint Probability discriminadas por mes, para el caso de la estación Olaya Herrera. Estas probabilidades fueron ubicadas gráficamente, según el tipo de transición, junto a la probabilidad asociada en la matriz de Joint Probability para los datos completos. Esto con el fin de comparar visualmente la relación que tiene la transición seleccionada en el comportamiento global de los datos con el de mes

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



a mes en un año. La Gráfica 8 presenta un ejemplo de las gráficas de comparación de probabilidad de transición entre estados de humedad Wet-Wet por mes vs anual, para el caso de la estación 27015070 Olaya Herrera. En los meses más lluviosos en el Valle de Aburrá (mayo y octubre), existe una mayor probabilidad (alrededor del 30%) de tener transiciones de día húmedo a día húmedo.

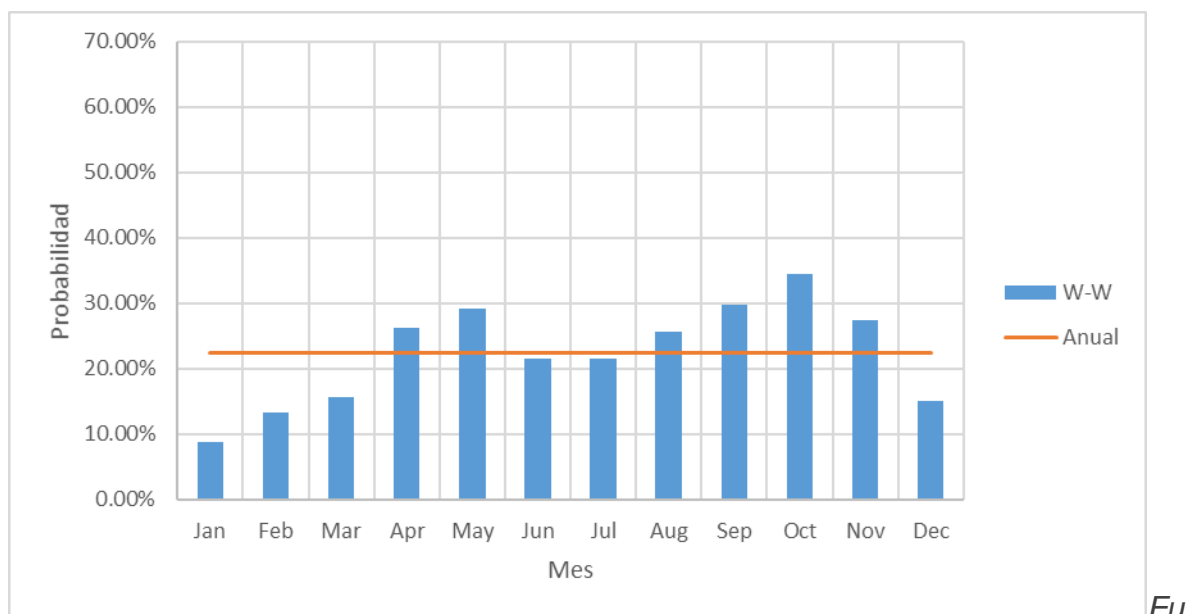
**Tabla 8.- Probabilidades conjuntas de transición de estados de humedad, discriminada por mes para la estación Olaya Herrera.**

Mes	D-D	D-W	D-S	W-D	W-W	W-S	S-D	S-W	S-S
Ene	63.43%	12.30%	0.75%	12.21%	8.87%	0.75%	0.94%	0.56%	0.19%
Feb	51.66%	15.01%	1.40%	14.85%	13.34%	1.04%	1.09%	1.35%	0.26%
Mar	42.25%	17.42%	1.69%	17.37%	15.59%	1.78%	1.27%	2.25%	0.38%
Abr	25.30%	17.58%	2.19%	17.10%	26.32%	4.37%	1.75%	4.66%	0.73%
May	22.38%	15.90%	2.67%	16.14%	29.29%	5.05%	2.24%	5.62%	0.71%
Jun	35.18%	16.47%	1.44%	17.19%	21.54%	3.16%	1.53%	3.16%	0.34%
Jul	41.82%	15.28%	1.16%	15.01%	21.49%	1.85%	1.20%	1.99%	0.19%
Ago	33.24%	17.00%	0.85%	15.59%	25.68%	3.29%	1.50%	2.54%	0.33%
Sep	24.81%	16.99%	1.84%	16.94%	29.85%	3.83%	1.65%	3.69%	0.39%
Oct	16.06%	16.81%	2.39%	16.67%	34.55%	5.26%	2.39%	5.12%	0.75%
Nov	24.59%	18.04%	2.33%	18.57%	27.35%	3.25%	2.13%	3.35%	0.39%
Dic	47.24%	15.43%	1.19%	16.43%	15.10%	1.43%	1.10%	1.81%	0.29%

*Fuente: Elaboración propia.*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Gráfica 8.- Probabilidades de transición Wet-Wet por mes vs total multianual para la estación Olaya Herrera.**

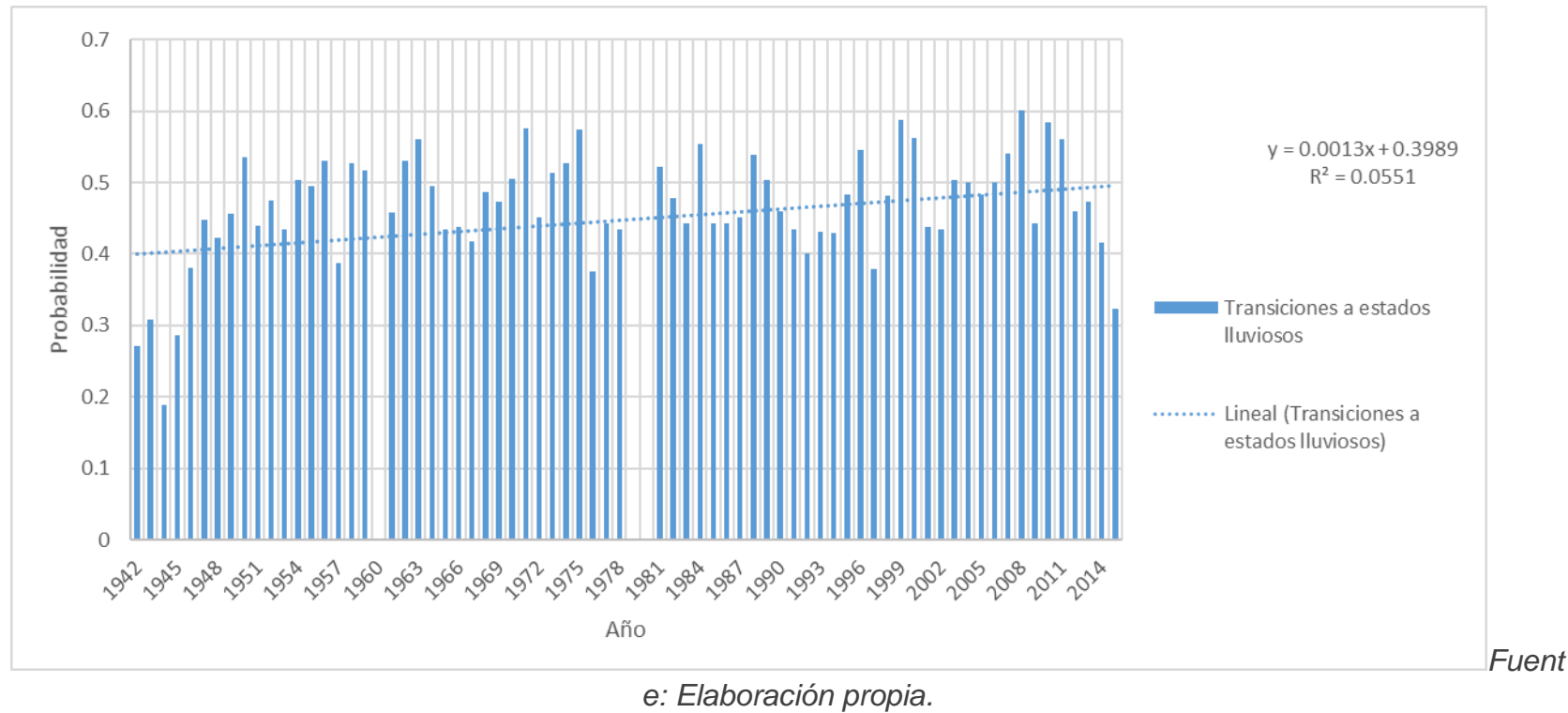


ente: *Elaboración propia.*

Las probabilidades de las transiciones a estados húmedos (Dry-Wet, Dry-SWet, Wet-Wet, Wet-SWet, SWet-Wet, SWet-SWet) se presentan en la ver Gráfica 9. Se obtiene que, con un nivel de significancia del 5%, existe una tendencia estadísticamente significativa ( $p = 0.041$ ) de aumento en las transiciones a estados de humedad que pueden suspender las actividades de una obra.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Gráfica 9.- Probabilidad de transición a un día con estado de humedad lluvioso.**



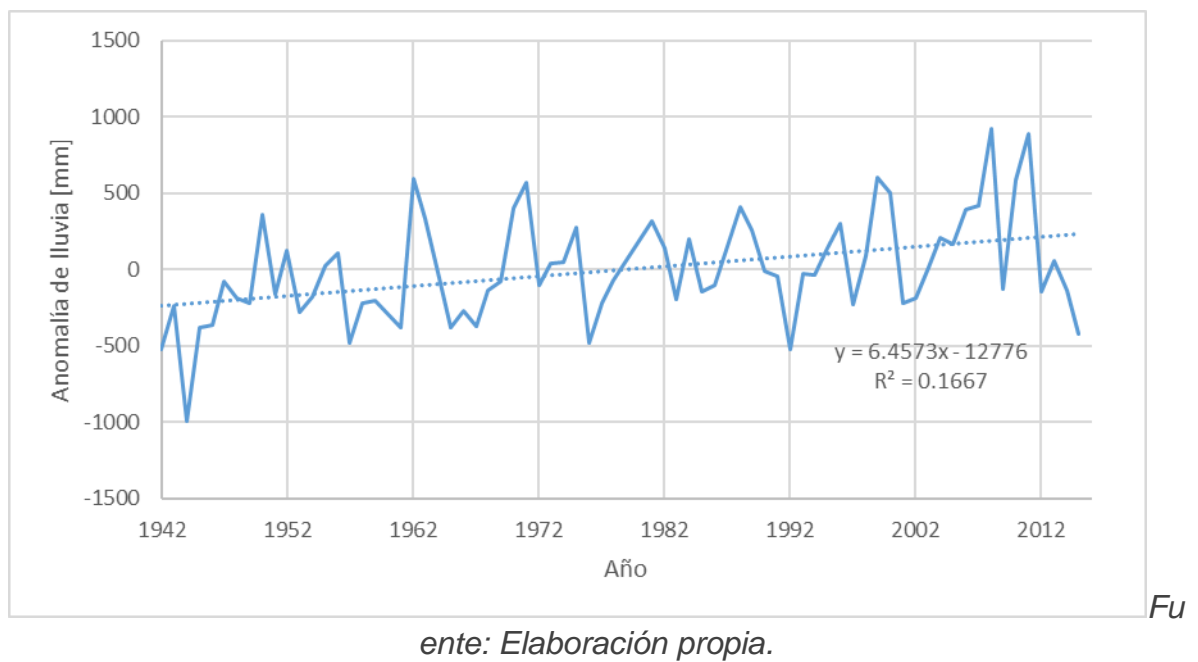
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

○ **Resultados del análisis de señales climáticas**

La Gráfica 10 presenta la serie de anomalías en la lámina de lluvia total anual de la estación Olaya Herrera. Los registros observados evidencian que existe una tendencia creciente estadísticamente significativa ( $p = 0.00045$ ) a un nivel de significancia del 5%. La tendencia indica un incremento en la lámina de lluvia total anual en el largo plazo con una tasa cercana a los 6.5 mm/año, correspondientes a un incremento del 0.4% anual aproximadamente.

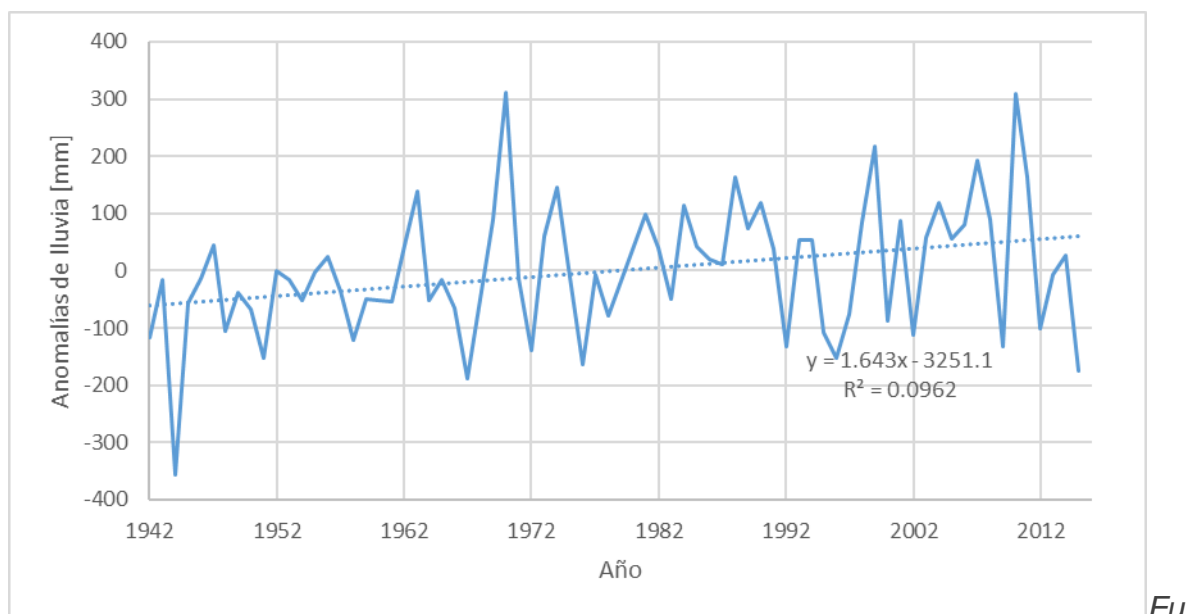
**Gráfica 10.- Anomalías en la lámina de lluvia total anual de la estación Olaya Herrera.**



De igual forma se presenta, en la Gráfica 11, las anomalías en la lámina de lluvia total del trimestre Septiembre-Octubre-Noviembre (SON) de la estación Olaya Herrera. Los registros observados muestran una tendencia creciente estadísticamente significativa ( $p = 0.0085$ ) a un nivel de significancia del 5%, de aproximadamente 1.6 mm/año para cada trimestre lluvioso SON.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Gráfica 11.- Anomalías en la lámina de lluvia total para el trimestre Sep-Oct-Nov de la estación Olaya Herrera.**



ente: *Elaboración propia.*

Una vez se obtuvieron las anomalías de la lámina de lluvia total anual y por trimestre, se encontraron los valores asociados a las señales climáticas con promedios móviles. La Gráfica 12 presenta la superposición de las gráficas producto del análisis de las señales climáticas mencionadas en el numeral 2.3.4. Además, se presentan en la Tabla 9 los coeficientes de correlación y sus cuadrados entre las señales analizadas y las anomalías. La Quasi-Biennial Oscillation describe el 66.45% de la variabilidad de las anomalías de precipitación total anual registradas en la estación Olaya Herrera. El Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur explica, por su parte, el 47.3% de tal variabilidad.

**Tabla 9.- Correlación y  $R^2$  entre señales y anomalías de precipitación total anual para la estación Olaya Herrera.**

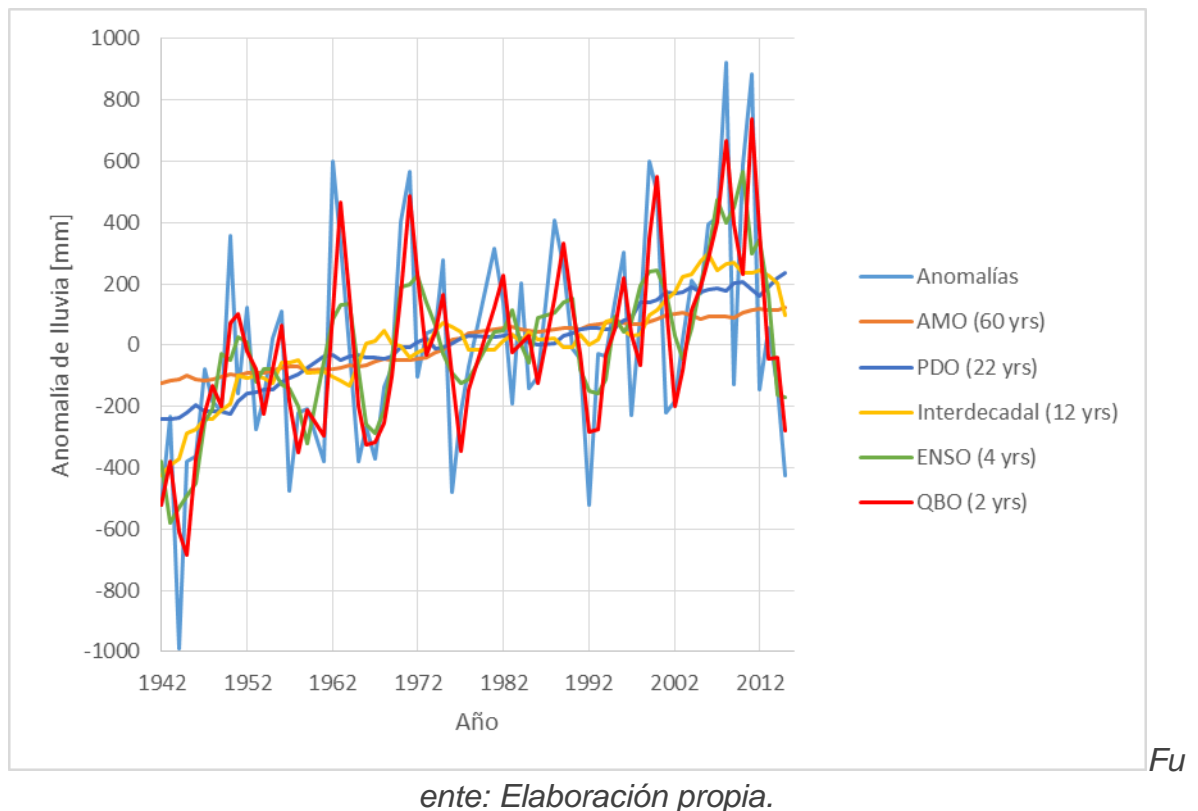
Señal	Coeficiente de correlación con anomalías	$R^2$
AMO	0.3694	0.1365
PDO	0.4157	0.1728
Interdecadal	0.4566	0.2085
ENSO	0.6879	0.4732

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Señal	Coeficiente de correlación con anomalías	R <sup>2</sup>
QBO	0.8152	0.6645

*Fuente: Elaboración propia.*

**Gráfica 12.- Señales climáticas sobre anomalías de la lámina de lluvia total anual de la estación Olaya Herrera.**



De igual forma se procesaron las señales mediante promedios móviles para los cuatro trimestres del año. La Gráfica 13 presenta la superposición de las series de señales climáticas con las anomalías en la lámina de lluvia para el trimestre Junio-Julio-Agosto (JJA) de la estación Olaya Herrera. Además, se presenta en la Tabla 10 los coeficientes de correlación y los valores  $R^2$  entre las señales analizadas y las anomalías. La Quasi-Biennial Oscillation explica el 53.29% de la variabilidad de las anomalías de la lámina de lluvia total del trimestre JJA registradas en la estación Olaya Herrera durante el período instrumental 1942-2016, mientras que el ENSO explica el 31.35% de tal variabilidad.

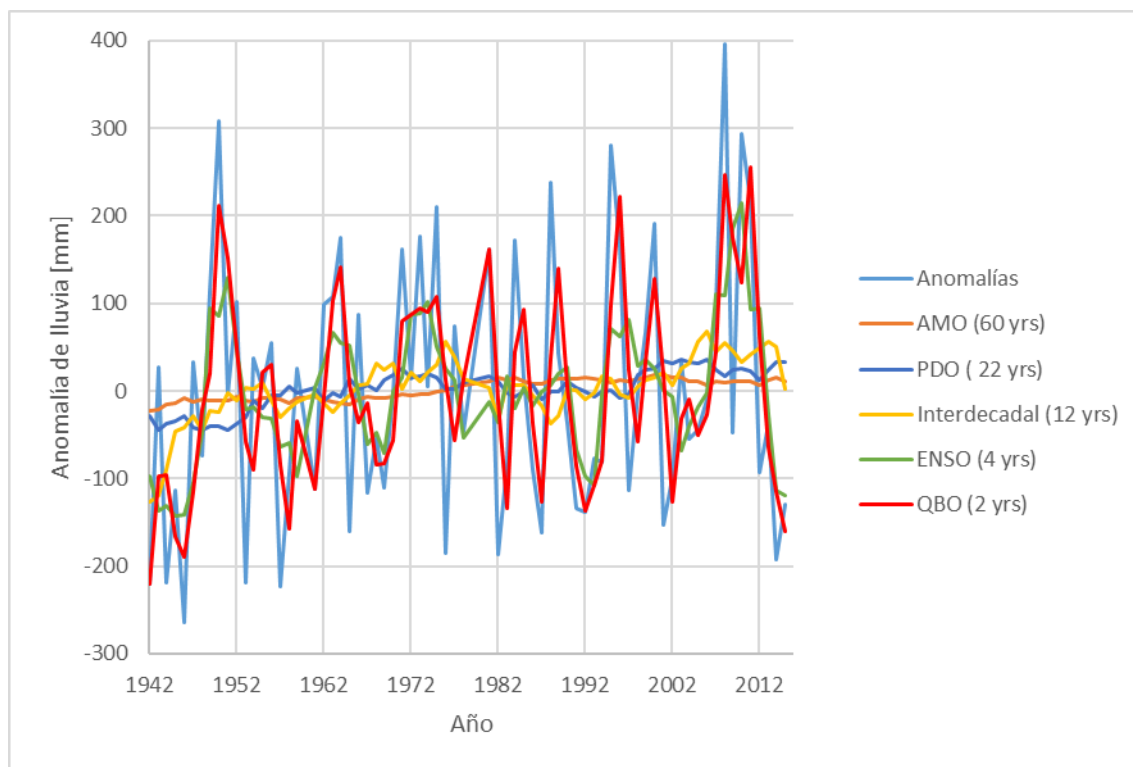
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Tabla 10.- Correlación y  $R^2$  entre señales y anomalías de la lámina de lluvia total del trimestre Junio-Julio-Agosto para la estación Olaya Herrera.**

Señal	Coefficiente de correlación	$R^2$
AMO	0.1027	0.0106
PDO	0.0844	0.0071
Interdecadal	0.2042	0.0417
ENSO	0.5599	0.3135
QBO	0.7300	0.5329

*Fuente: Elaboración propia.*

**Gráfica 13.- Señales climáticas sobre anomalías de la lámina de lluvia precipitación total para el trimestre Junio-Julio-Agosto de la estación Olaya Herrera.**



*Fu*

*ente: Elaboración propia.*

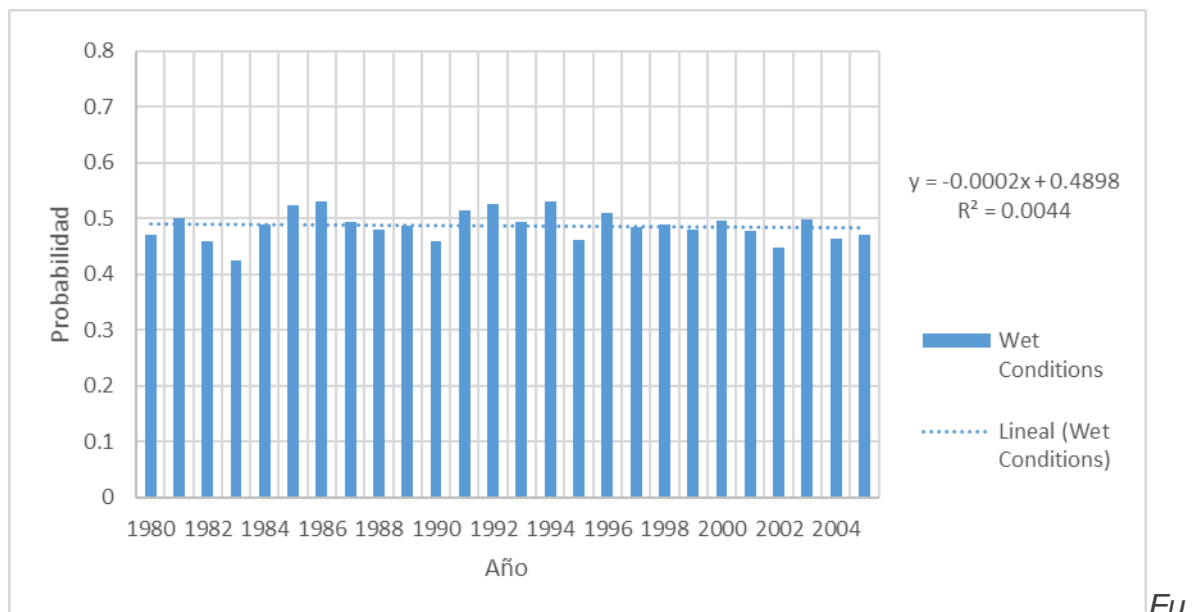
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



○ **Resultados de análisis con modelos de precipitación global**

La Gráfica 14 presenta un ejemplo del comportamiento en el largo plazo de la probabilidad de transición a un día con estado de humedad lluvioso para el caso de la estación Olaya Herrera, obtenida a partir de los resultados de simulación retrospectiva del modelo de circulación global MPI-ESM-LR y luego de la implementación de la técnica de reducción de escala de kNN.

**Gráfica 14.- Probabilidad de transición a un día con estado de humedad lluvioso para la estación Olaya Herrera según los resultados de simulación del modelo MPI-ESM-LR.**



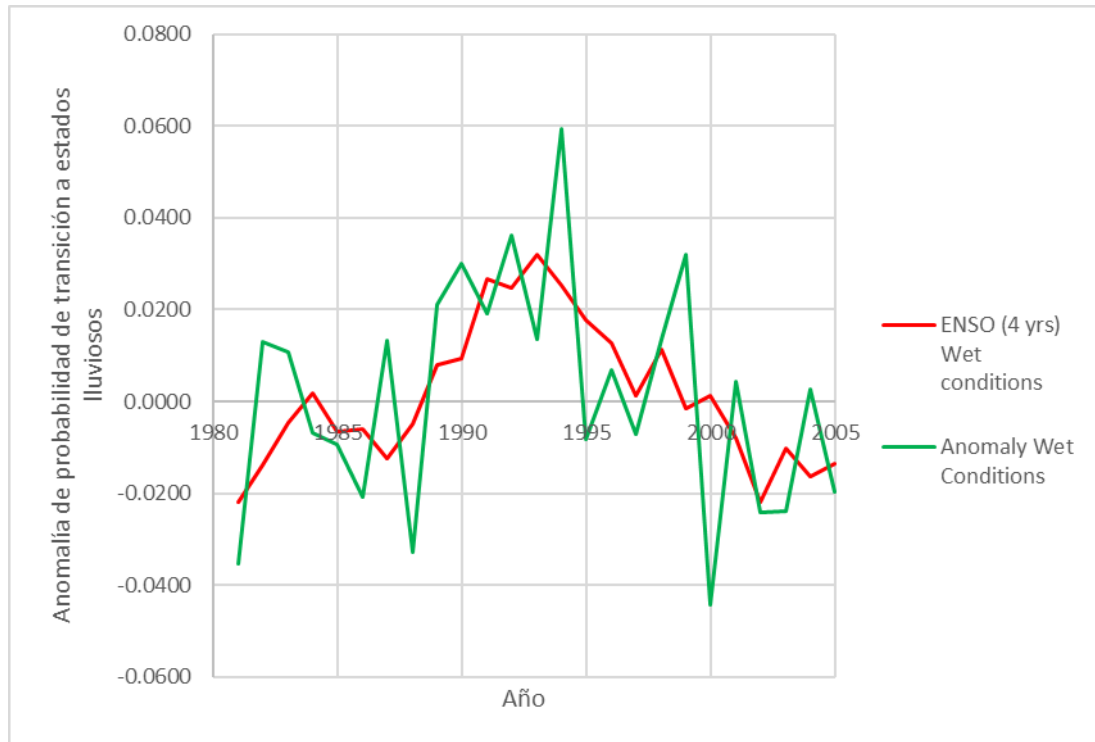
ente: Elaboración propia.

Es importante anotar que, a diferencia de la regresión lineal de las probabilidades reales de transición a estados lluviosos para la estación en Olaya Herrera, la regresión sobre los resultados de simulación de los modelos apunta a que no existe una tendencia creciente o decreciente estadísticamente significativa ( $p = 0.7484$ , con significancia del 5% para el modelo MPI-ESM-LR).

Además se realizó la superposición de la señal ENSO (calculada como en el análisis de señales climáticas, pero para las probabilidades de transición a días con estado lluvioso para los modelos analizados) sobre las anomalías de probabilidad de transición a estado lluvioso de cada uno de los modelos seleccionados. Véase la Gráfica 15 muestra para el caso de la estación Olaya Herrera, según los resultados de simulación del modelo de circulación GISS-E2-R.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Gráfica 15.- Señal climática ENSO sobre anomalías de probabilidad de transición a estado lluvioso para la estación Olaya Herrera según los resultados de simulación del modelo GISS-E2-R.**



Fuente

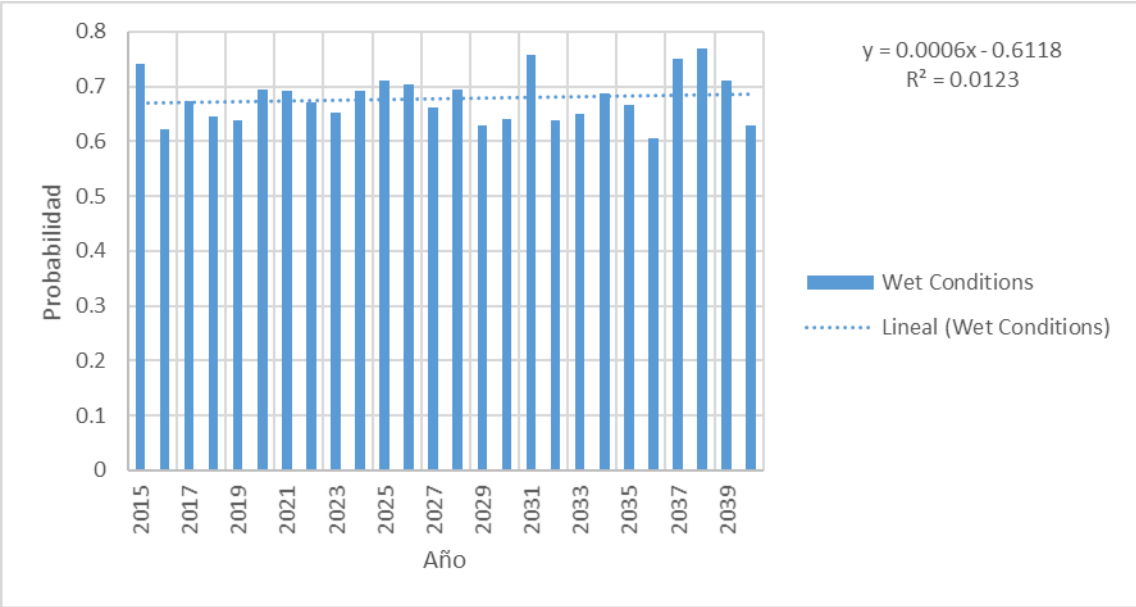
e: Elaboración propia.

Luego de analizar los errores medios entre la probabilidad de transición a estados lluviosos año a año para todos los modelos con las reales, se encuentra que el modelo que menor error medio presenta respecto a las condiciones reales es el MPI-ESM-LR (error medio = 1.87% respecto a las probabilidades reales). Por este motivo, se decide trabajar con proyecciones del modelo del Max Planck Institute. Por este motivo, el análisis de las proyecciones se hizo con el modelo MPI-ESM-LR bajo el RCP8.

La Gráfica 16 presenta la proyección de la probabilidad de transición a un día con estado de humedad lluvioso según los resultados de simulaciones prospectivas del modelo MPI-ESM-LR bajo el RCP 8.5, y para la estación Olaya Herrera. Si esta gráfica se compara con la Gráfica 14, se encuentra que existe un importante aumento en la probabilidad de encontrar transiciones a días lluviosos, lo que indica que, probablemente, en el futuro la lluvia será un factor mucho más determinante en los calendarios de obra de lo que es actualmente.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Gráfica 16.- Proyección de probabilidad de transición a un día con estado de humedad lluvioso del modelo MPI-ESM-LR, escenario RCP 8.5, para la estación Olaya Herrera.**



Fu

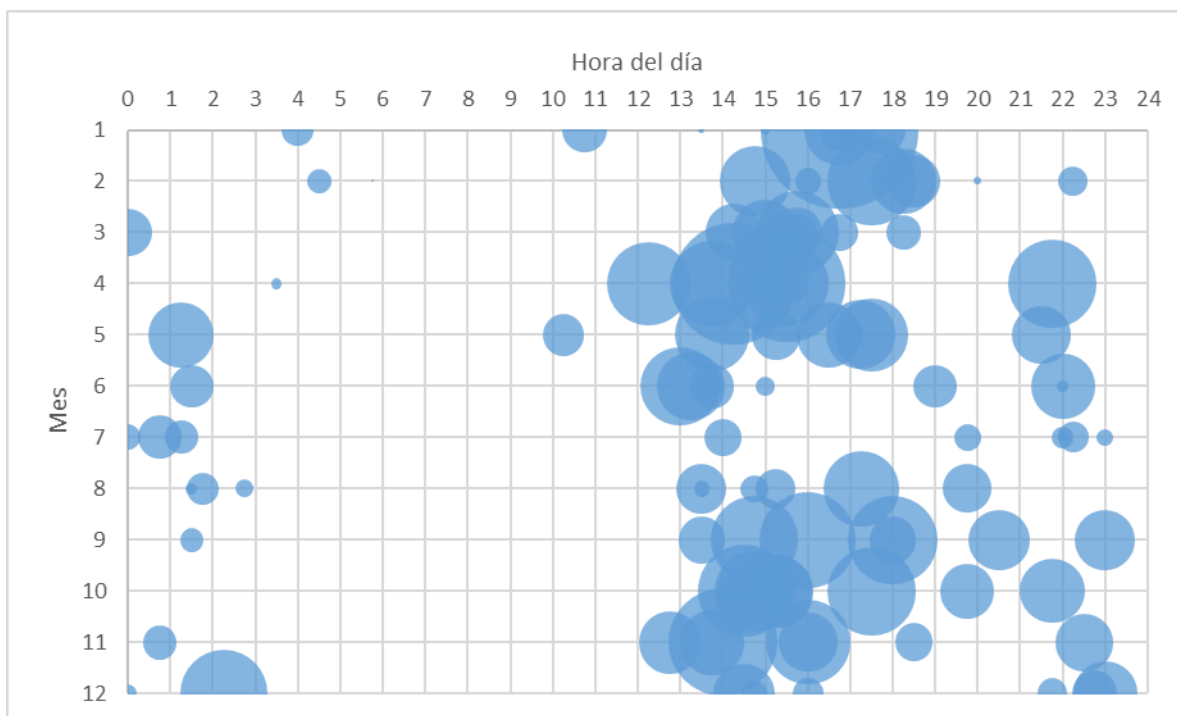
ente: Elaboración propia.

### 3.2.5 Resultados del análisis multianual de la precipitación total cada 15 minutos.

La Gráfica 17 presenta el resultado del análisis de la lluvia máxima en 15 minutos para cada mes en los 8 años de registros de la estación Planta de Filtros Villahermosa. En el eje horizontal se puede encontrar la hora de ocurrencia del evento de lluvia máximo. En el vertical se lee el mes en el que ocurrió el evento. El tamaño de la burbuja relaciona la magnitud de la lluvia registrada.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Gráfica 17.- Gráfica de burbujas para la lámina de lluvia máxima de 15 minutos de duración por mes según los registros de la estación Planta de Filtros Villahermosa.**

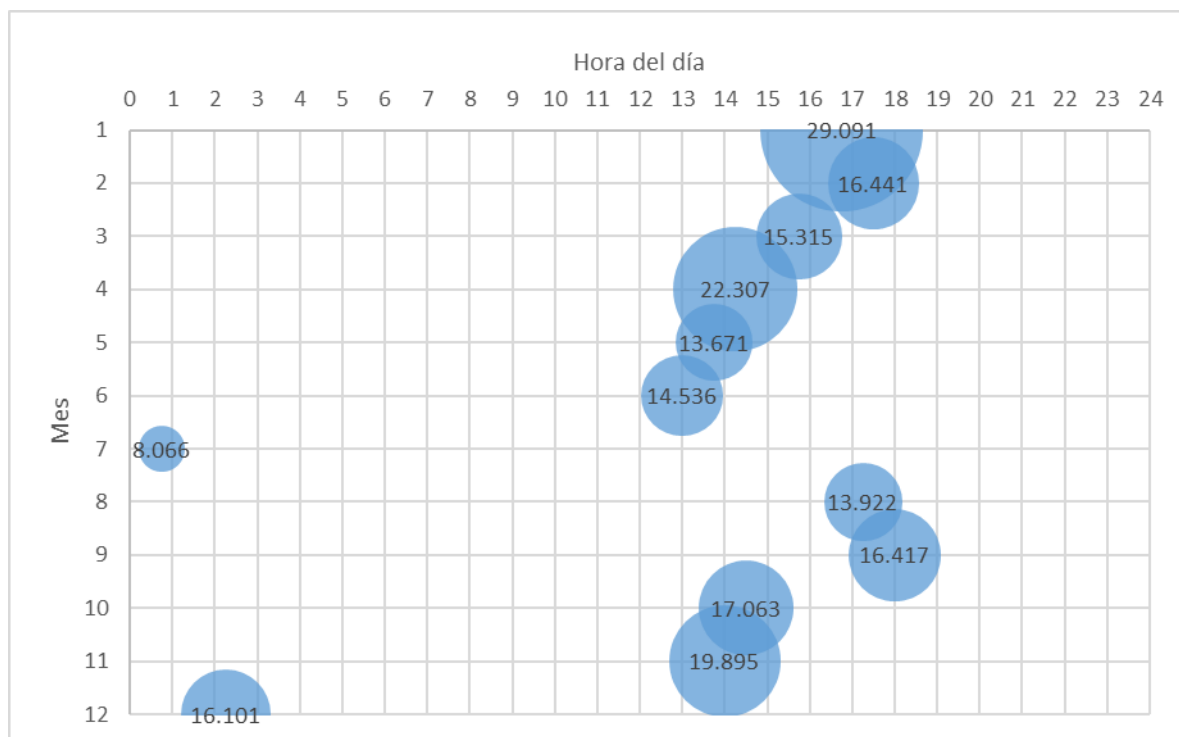


*Fuente: Elaboración propia.*

La Gráfica 18 presenta también una gráfica de burbuja para el evento de lluvia de 15 minutos de duración máximo de cada mes pero de manera multianual (máximo de los máximos registrados en los 8 años de registros de la estación). En este caso, además de poseer los mismos que la Gráfica 17, dentro de la burbuja se puede leer la lámina de lluvia asociada a dicho evento.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Gráfica 18.- Gráfica de burbujas para la lámina de lluvia máxima de 15 minutos de duración por mes (máximo multianual) según los registros de la estación Planta de Filtros Villahermosa.**



*Fuente: Elaboración propia.*

En ambas gráficas se puede evidenciar que los eventos máximos de lluvia de 15 minutos de duración suelen ocurrir entre las 12 m y las 5 pm en las estaciones lluviosas del año, mientras que en las secas tienden a ocurrir en las horas de la madrugada.

Por otro lado, la Tabla 11 presenta la matriz de probabilidades de obtener láminas máximas de lluvia de 15 minutos de duración en un día, según la hora y el mes de análisis. La tabla se presenta exclusivamente para la estación 2701045 Planta de Filtros Villahermosa. En la matriz se pueden ver las probabilidades mencionadas acompañadas de una convención de color que va desde verde, para las probabilidades más bajas, hasta rojo para las más altas. Este mismo resultado es presentado de manera esquemática en forma de superficie en la Gráfica 19, en donde en la altura de la superficie se puede leer la probabilidad asociada a una hora del día (que se grafican en el eje horizontal) y a un mes del año (que se muestran en el eje en profundidad).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Tabla 11.- Matriz de probabilidades de lámina de lluvia máxima de 15 minutos de duración según la hora del día y mes del año para la estación Planta de Filtros Villahermosa**

Hora/mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0	0.72%	2.78%	5.38%	6.30%	7.89%	5.93%	10.39%	4.66%	12.08%	6.85%	7.50%	4.44%
1	1.79%	2.38%	3.94%	4.44%	4.66%	6.30%	5.73%	10.04%	5.83%	5.24%	2.92%	2.82%
2	2.51%	2.78%	2.15%	1.85%	3.94%	4.44%	5.38%	4.66%	5.00%	5.65%	2.92%	1.61%
3	1.43%	1.19%	0.72%	4.07%	2.87%	3.33%	3.23%	4.30%	3.33%	2.82%	3.33%	0.81%
4	3.23%	2.38%	1.08%	1.85%	3.94%	0.74%	2.15%	0.72%	2.92%	2.02%	1.67%	1.21%
5	1.79%	0.79%	2.15%	2.22%	1.43%	1.11%	0.72%	1.43%	0.83%	0.40%	1.67%	0.81%
6	1.43%	0.40%	0.72%	1.85%	0.00%	0.37%	2.15%	0.36%	0.83%	2.02%	1.67%	1.61%
7	1.79%	0.79%	0.72%	0.37%	0.36%	1.48%	2.15%	0.72%	0.42%	2.82%	1.67%	0.81%
8	1.08%	0.40%	1.08%	0.74%	1.79%	1.11%	0.72%	1.79%	0.00%	0.81%	0.00%	0.40%
9	0.72%	0.79%	1.08%	1.48%	1.79%	0.74%	0.36%	0.00%	0.42%	0.81%	0.42%	0.81%
10	1.43%	0.40%	0.72%	0.74%	1.43%	1.85%	2.15%	0.36%	0.00%	2.82%	1.25%	0.81%
11	1.79%	0.79%	1.79%	1.11%	1.79%	0.37%	1.79%	1.43%	1.25%	1.61%	2.50%	1.61%
12	1.08%	0.40%	2.15%	3.33%	1.08%	4.07%	0.72%	0.72%	2.08%	2.42%	2.50%	3.23%
13	1.43%	1.59%	2.15%	5.19%	3.23%	3.33%	1.08%	2.15%	2.50%	6.05%	6.67%	2.82%
14	0.00%	2.38%	6.45%	5.19%	5.02%	1.48%	1.43%	1.43%	5.42%	9.27%	7.50%	6.45%
15	3.94%	3.17%	7.53%	5.93%	2.87%	1.85%	0.36%	1.43%	1.67%	5.65%	7.08%	4.84%
16	3.94%	2.78%	3.94%	2.96%	1.08%	1.11%	0.72%	1.79%	2.50%	5.24%	2.92%	5.65%
17	2.87%	3.57%	2.87%	2.96%	3.58%	0.37%	0.00%	2.15%	1.25%	3.23%	2.92%	4.44%
18	0.72%	1.19%	2.51%	1.85%	4.66%	1.11%	0.00%	2.15%	2.08%	2.42%	3.33%	1.61%
19	0.72%	1.98%	3.23%	0.00%	2.15%	2.22%	0.72%	2.51%	2.50%	4.44%	0.42%	0.40%
20	1.43%	0.79%	1.79%	2.22%	3.23%	2.59%	1.79%	0.36%	2.08%	2.02%	2.08%	0.40%

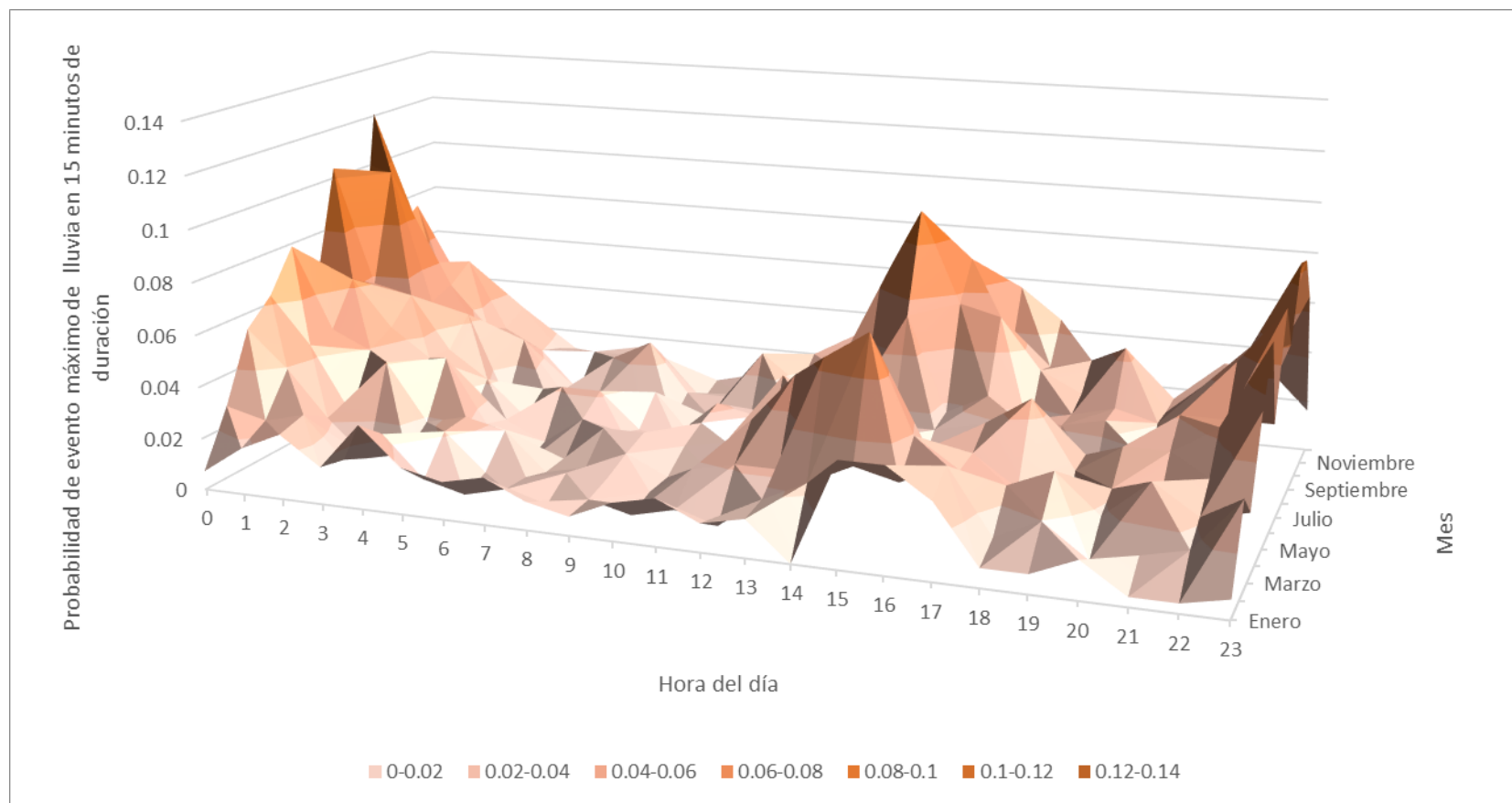
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Hora/mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
21	0.36%	1.19%	3.23%	1.85%	3.23%	4.07%	3.58%	2.15%	3.75%	2.42%	2.50%	3.23%
22	0.36%	1.59%	2.15%	2.96%	4.30%	4.07%	5.73%	1.43%	5.42%	1.61%	2.92%	3.23%
23	0.72%	3.57%	2.51%	5.56%	7.53%	4.07%	7.89%	6.09%	8.75%	8.47%	6.67%	1.61%

*Fuente: Elaboración propia*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Gráfica 19.- Superficie de probabilidades de eventos máximos de lluvia de 15 minutos de duración en una hora del día para la estación Planta de Filtros Villahermosa.**



*Fuente: Elaboración propia.*

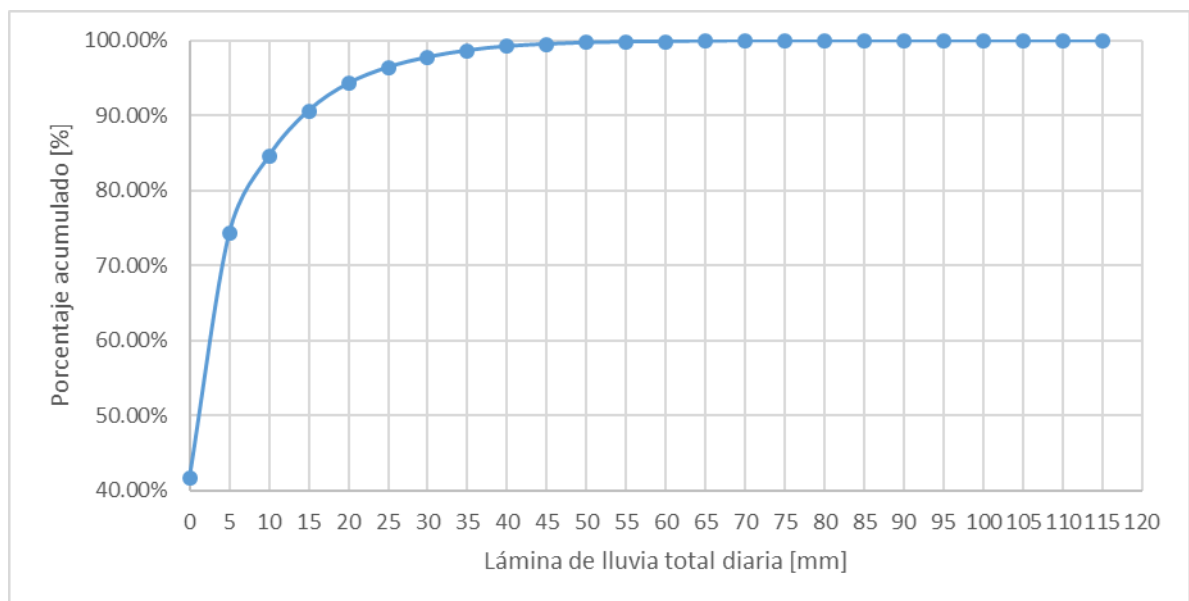
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



### 3.3 RESULTADO DE LA DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE LLUVIA PARA LA INTERRUPCIÓN DEL MOVIMIENTO DE TIERRAS.

Luego de comparar las fechas de interrupción de actividades de una construcción de Concreto con las láminas de lluvia asociadas a dichos días en el registro histórico de las estaciones pluviométricas y pluviográficas del sector, y teniendo en cuenta que en las fechas evaluadas se estuviesen llevando a cabo actividades que relacionen el movimiento de tierras, se encuentra que el umbral de lámina de lluvia que eventualmente puede interrumpir la actividad de movimiento de tierras es de aproximadamente 5 mm/día. Este valor está asociado, aproximadamente, al percentil 74° de la lluvia total diaria de los registros multianuales (ver Gráfica 20). Es decir que dicho umbral de interrupción es igualado o excedido tan sólo el 26% de las ocasiones.

**Gráfica 20.- Porcentaje acumulado de la lámina de lluvia total diaria en la estación Olaya Herrera producto del análisis multianual.**

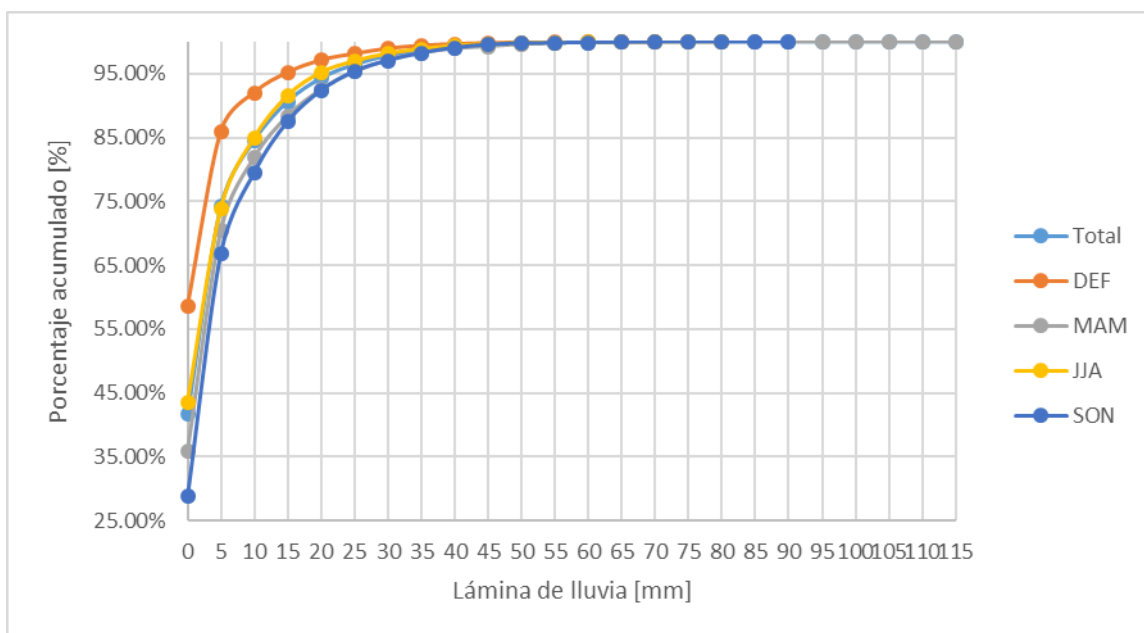


*Fuente: Elaboración propia.*

Del análisis multianual de la lámina de lluvia diaria agrupada por mes y por trimestre para la estación Olaya Herrera, se obtuvieron las gráficas de porcentaje acumulado trimestral (ver Gráfica 21) y mensual (ver Gráfica 22).

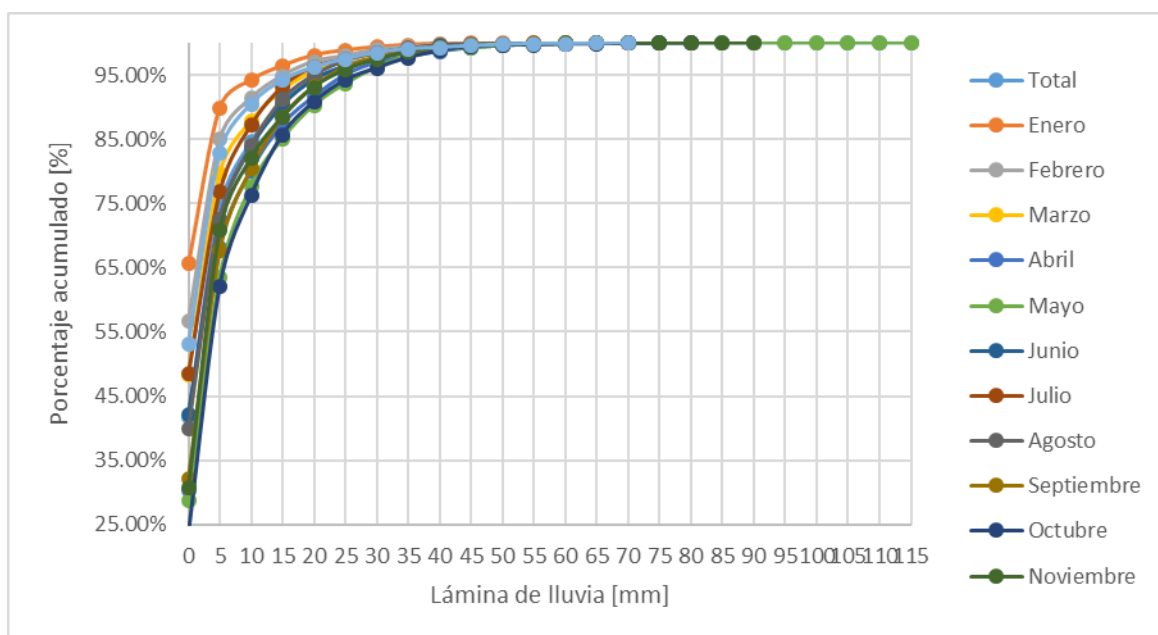
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Gráfica 21.- Porcentaje acumulado de la lámina de lluvia total diaria por trimestre en la estación Olaya Herrera, producto del análisis multianual.**



*Fuente: Elaboración propia.*

**Gráfica 22.- Porcentaje acumulado de la lámina de lluvia total diaria por mes en la estación Olaya Herrera, producto del análisis multianual.**

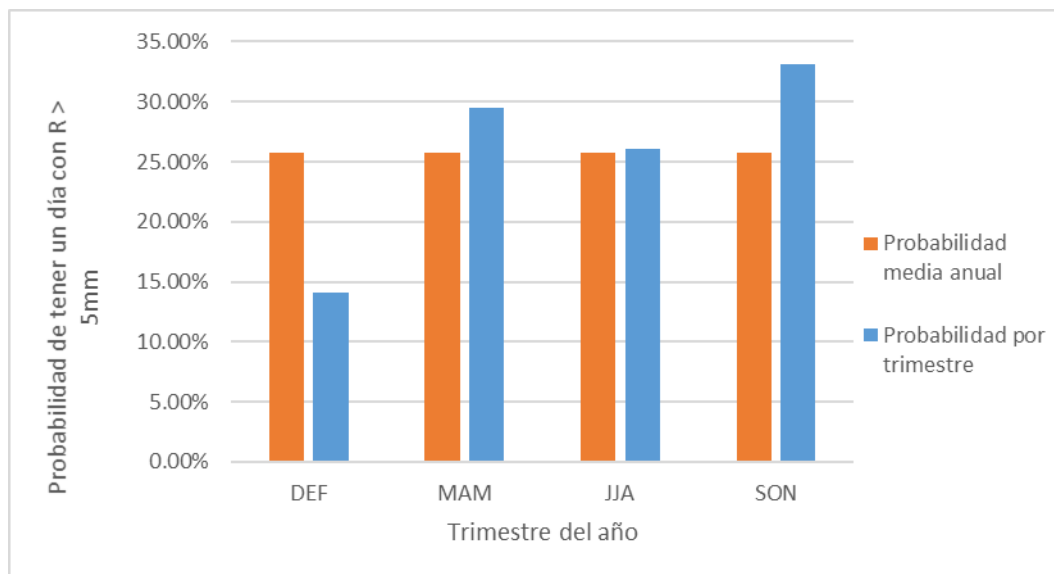


*Fuente: Elaboración propia.*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La Gráfica 23 presenta la probabilidad por trimestre de tener al menos un día con lámina de lluvia total superior al umbral de suspensión de 5 mm de lluvia.

**Gráfica 23.- Probabilidad por trimestre de tener al menos un día con lámina de lluvia superior a 5mm.**

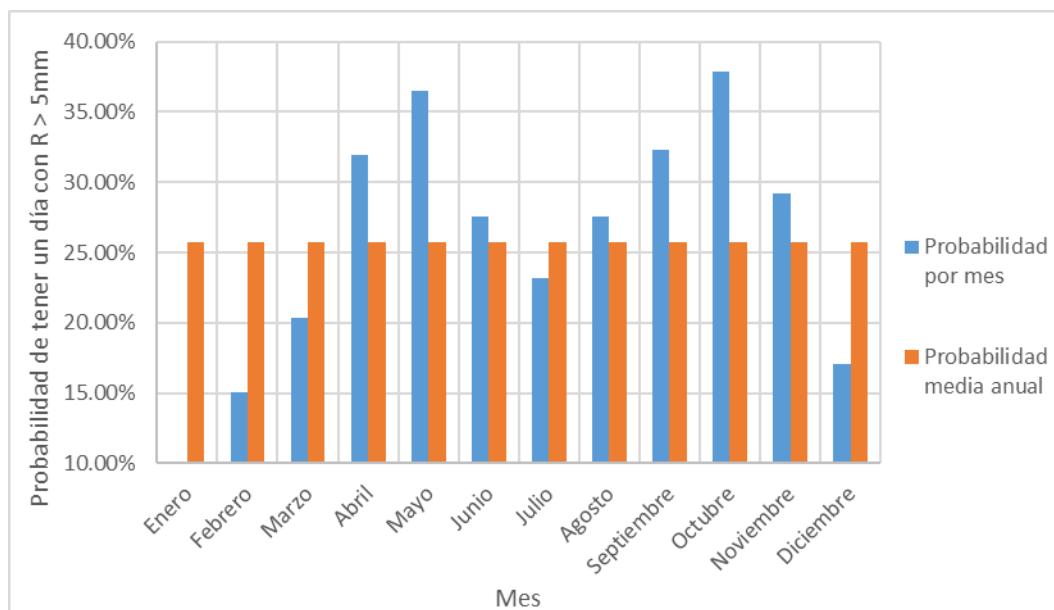


*Fuente: Elaboración propia.*

De igual forma, la Gráfica 24 presenta la probabilidad mes a mes de tener láminas de lluvia diarias superiores al umbral de suspensión de 5 mm.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Gráfica 24.- Probabilidad por mes de tener al menos 1 día con lámina de lluvia superior a 5mm (p(B)).**



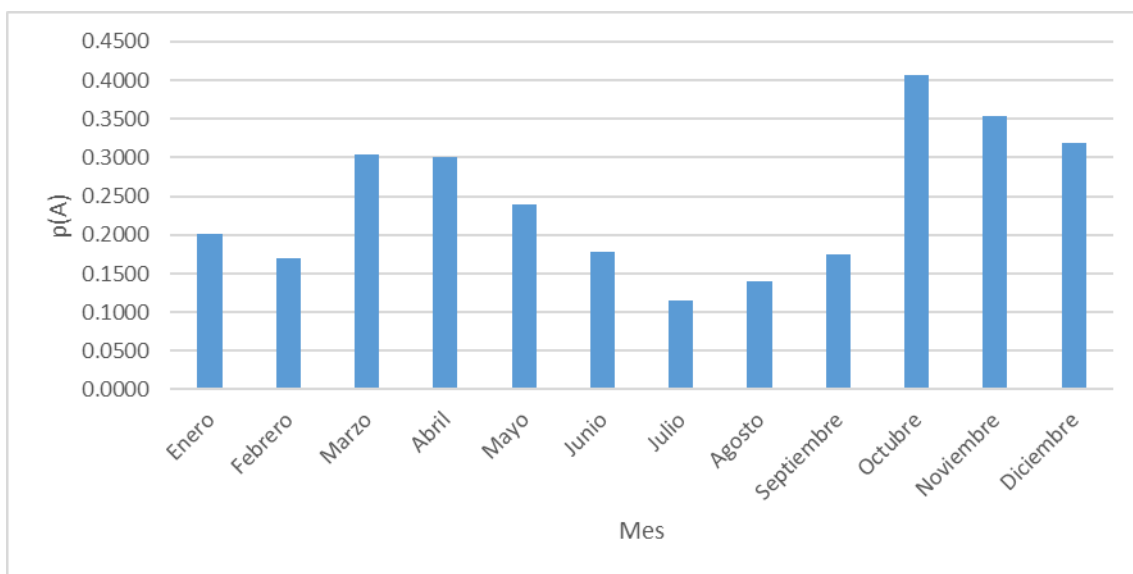
*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.4 RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DEL TIEMPOS DE EXTENSIÓN PARA MOVIMIENTO DE TIERRAS

El resultado de la p(A) se puede ver en la Gráfica 25, mientras que la p(B) se detalla en la Gráfica 24.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

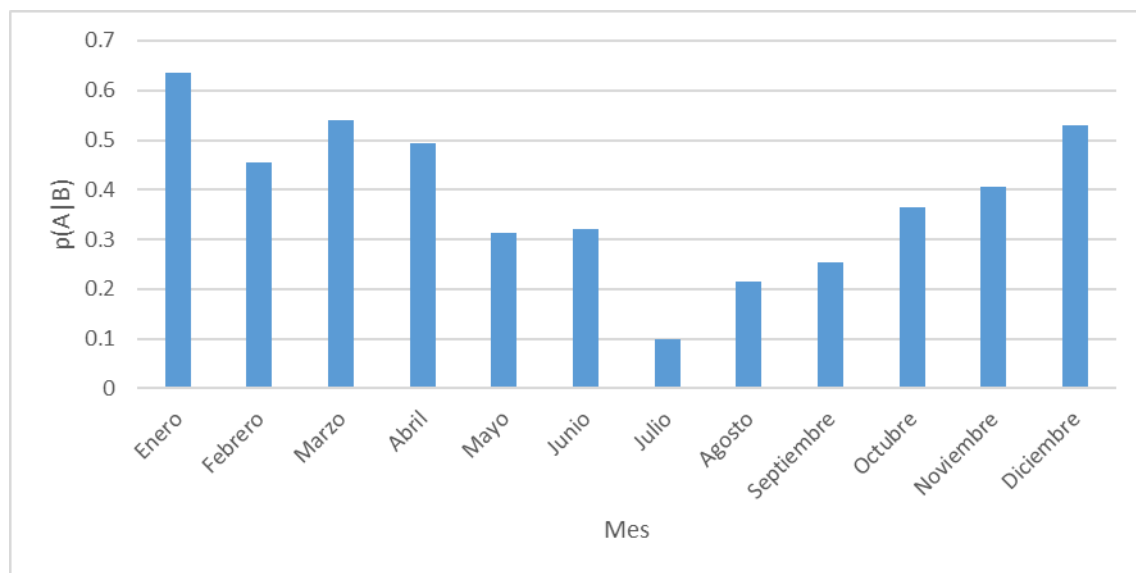
**Gráfica 25.- Probabilidad por mes de presentarse una lámina de alta intensidad de 15 minutos de duración en el horario laboral ( $p(A)$ ).**



*Fuente: Elaboración propia.*

La Gráfica 26 presenta la  $p(A|B)$  y la Gráfica 27 muestra la  $p(A \cap B)$ .

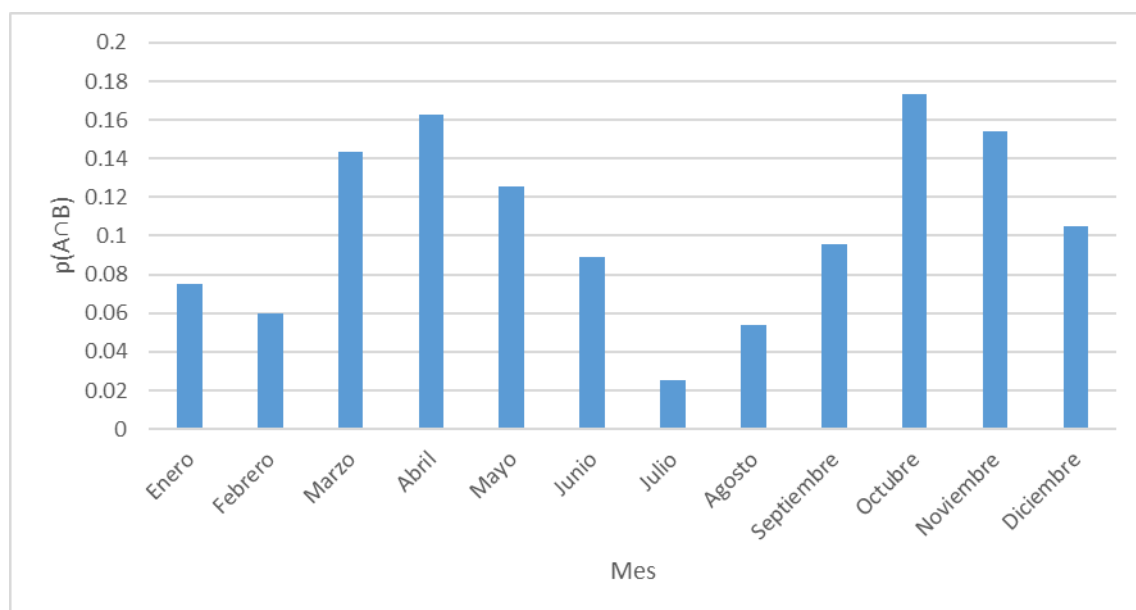
**Gráfica 26.-  $p(A|B)$  por mes como resultado del análisis de la estación Villa Hermosa.**



*Fuente: Elaboración propia.*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Gráfica 27.-  $p(A \cap B)$  por mes como resultado del análisis de la información disponible de la estación Villa Hermosa.**

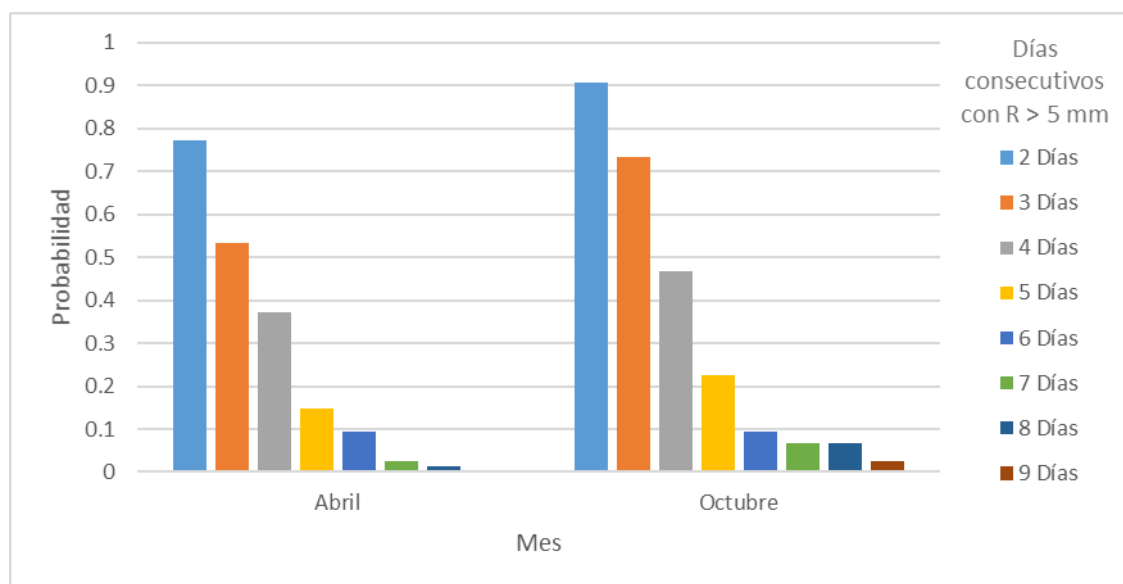


*Fuente: Elaboración propia.*

Finalmente, la Gráfica 28 presenta un ejemplo para los meses de abril y octubre (en los que la  $p(A \cap B)$  es más alta) de la probabilidad de tener entre 2 y 9 días consecutivos con lámina de lluvia superior al umbral de 5 mm.

La gráfica realizada para todos los meses se presenta como anexo al final de este documento.

**Gráfica 28.- Probabilidad de tener entre 2 y 9 días consecutivos con lámina de lluvia superior a 5 mm.**



Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

#### **4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES**

- Para el desarrollo de actividades de movimiento de tierras son particularmente críticos los trimestres marzo-abril-mayo y octubre-noviembre-diciembre, ya que son los que presentan mayores probabilidades de ocurrencia de eventos que pueden detener tales actividades. El mes de octubre, específicamente, es el que posee mayores probabilidades de tener rachas de días consecutivos con lámina de lluvia superior al umbral de 5 mm/día propuesto.
- El análisis horario de la precipitación en el Valle de Aburrá, permite observar una marcada tendencia a la ocurrencia de eventos máximos de lluvia de 15 minutos de duración entre las 12 m y las 5 pm. Esto responde al incremento de la capacidad de retención de agua de la atmósfera, en el proceso de ascenso en la vertical de corrientes de aire caliente, en las horas de la tarde, que permiten la condensación del vapor de agua y la posterior precipitación líquida en el Valle. Los estructuradores o programadores de las actividades de los proyectos deben tener cuidado en la asignación de horas para la realización de las actividades en el día, especialmente en los meses de marzo a mayo y septiembre a diciembre.
- Se recomienda el uso de protocolos para la toma de información pluviométrica y pluviográfica con el fin de evitar la introducción de errores en el análisis de la información de pluviosidad disponible. Un ejemplo del manejo adecuado de la información de lámina de lluvia diaria se da en la información recolectada por el IDEAM, ya que se diferencia la ausencia de datos con los días con lámina total igual a cero.
- Dada la evidencia de incremento en la racha máxima de días lluviosos consecutivos en el largo plazo, y teniendo en cuenta el cambio que sufriría el comportamiento climático del Valle de Aburrá bajo el escenario RCP +8.5 W/m<sup>2</sup>, es recomendable repetir el análisis desarrollado en este trabajo con la información que ofrece el modelo MPI-ESM-MR para considerar las probabilidades de suspensión del movimiento de tierras en caso que se presente este cambio en el balance radiativo del planeta.
- El umbral de interrupción del movimiento de tierras de 5 mm de lámina de lluvia debe evaluarse y recalcularse con la metodología aquí planteada, pero para un horizonte de registros más extenso. En este trabajo no fue posible conseguir información de una bitácora de construcción muy

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



extensa, por lo que el umbral aquí propuesto solo pudo ser calculado con la lámina total diaria. Debido a esto se propone evaluar los efectos de la lámina cada 15 minutos en la interrupción de la obra, una vez se tengan registros más actualizados de precipitación cada 15 minutos que puedan ser comparados con la información de bitácora digital que las empresas están comenzando a usar.

- Se recomienda a los constructores llevar su propio registro de información para facilitar y aproximar más los estudios de interrupción de las labores en construcción debido a la lluvia en sus obras.
- El presente trabajo toma como supuesto la independencia estadística de los nombrados evento A y B para dar una aproximación de las probabilidades de obtener un día con lámina superior al umbral y que el mismo día se presente un evento máximo en un horario laboral, para aproximar las probabilidades de suspensión del movimiento de tierras, sin embargo, se recomienda evaluar éste supuesto y proponer tiempos de extensión basados en la probabilidad dada por la cantidad de intervalos de 15 minutos dentro de un horario laboral que superen el umbral recalculado de interrupción (con una intensidad asociada a los 15 minutos de duración) en un mes determinado para todos los años de registro, sobre la cantidad de intervalos de 15 minutos de duración del horario laboral en dicho mes, para así generar modelos Montecarlo y evaluar la cantidad de tiempo de suspensión asociado a cada mes del año. Es importante aclarar que para lograr este propósito se debe tener, además, información de la duración de retoma de las actividades en construcción luego de terminada la lluvia.
- Dado que la obtención de la información necesaria para el desarrollo de este trabajo se dio de forma tardía debido a las restricciones que tienen las empresas para compartir dicha información, los análisis finales, como se indica en el trabajo, fueron desarrollados exclusivamente con la información de la estación Olaya Herrera para los registros diarios y Planta de filtros Villa Hermosa para los registros horarios. Debido a esto es recomendable repetir el análisis desarrollado en este trabajo incluyendo la información de la lámina de lluvia total diaria y cada 15 minutos de todas las estaciones de las que se tiene registro. Esto con el fin de evaluar el comportamiento de las condiciones climáticas del Valle de Aburrá teniendo en cuenta su distribución espacial.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## 5. REFERENCIAS

- AcuRite. (21 de Enero de 2012). *AcuRite*. Obtenido de <https://www.acurite.com/learn/weather-stations/what-is-a-weather-station>
- Bioingeniería. (s.f.). *Bioingeniería*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2016, de [http://www.bioingenieria.edu.ar/academica/catedras/metestad/PRUEBAS\\_DE\\_BONDAD\\_DE\\_AJUSTE-1.pdf](http://www.bioingenieria.edu.ar/academica/catedras/metestad/PRUEBAS_DE_BONDAD_DE_AJUSTE-1.pdf)
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hidrology*. Tata McGraw-Hill Education.
- Concreto. (Agosto de 2017). Registros de interrupción en obra debido a la lluvia. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Fèvre, M. (19 de Diciembre de 2011). Diagrama de Gantt. *Diagrama de Gantt mostrando tres tipos de precedencias (en rojo), porcentajes de avance y agrupación de actividades en rubros*. Obtenido de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GanttChartAnatomyES.svg>
- Gellens, D. (2002). Combining regional approach and data extension procedure for assessing GEV distribution of extreme precipitation in Belgium. *Journal of Hidrology*, 113-126.
- Inductiveload. (2 de Abril de 2008). Distribución normal acumulada. *A selection of Normal Distribution Cumulative Density Functions (CDFs). Both the mean,  $\mu$ , and variance,  $\sigma^2$ , are varied. The key is given on the graph*. Recuperado el 27 de Octubre de 2017, de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Normal\\_Distribution\\_CDF.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Normal_Distribution_CDF.svg)
- Iñaki, E. (8 de Mayo de 2000). *Actuarios*. Obtenido de [http://www.actuarios.org/espa/Revista18/extremos.htm#\\_edn1](http://www.actuarios.org/espa/Revista18/extremos.htm#_edn1)
- Kartam, S. (1999). Generic methodology for analyzing delay claims. *Journal of Construction*, 409-419.
- Met Office. (6 de Enero de 2016). *What is precipitation?* Recuperado el 15 de Septiembre de 2016, de <https://www.metoffice.gov.uk/learning/learn-about-the-weather/weather-phenomena/what-is-precipitation>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Minitab 18. (s.f.). *Soporte de Minitab*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/probability-distributions-and-random-data/supporting-topics/basics/using-the-cumulative-distribution-function-cdf/>
- Nguyen, L. D., Kneppers, J., García de Soto, B., P.E., A.M.ASCE, Ibbs, W., & M.ASCE. (2010). Analysis of Adverse Weather for Excusable Delays. *JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT* © ASCE.
- Ortega, J. (Octubre de 2008). *Centro de Investigación en Matemáticas, A.C.* Recuperado el 18 de Septiembre de 2016, de <http://www.cimat.mx/~jortega/MaterialDidactico/ExtrMVD/MvdClase1.pdf>
- RAE. (2001). Holgura. En *Diccionario de la lengua española*. 22.
- Revista ARQHYS. (Diciembre de 2012). *Revista ARQHYS*. Recuperado el 16 de Septiembre de 2016, de <http://www.arqhys.com/construccion/obra-calendario.html>
- SAGARPA. (2014). *Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2016, de [http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/INSTRUCTIVO\\_HIDROLOG%C3%8DA.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/INSTRUCTIVO_HIDROLOG%C3%8DA.pdf)
- Shahin, A., AbouRizk, S., & Mohamed, Y. (2011). Modeling Weather-Sensitive Construction Activity Using Simulation. *JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT* © ASCE, 238-246.
- Smith, R., & Vélez, M. V. (1997). *Hidrología de Antioquia*. Medellín: Secretaría de obras públicas. Recuperado el 15 de Septiembre de 2016
- Suárez Buenrostro, N. (2011). *Caracterización de eventos extremos de precipitación, empleando distribuciones mezcladas*. Tesis de maestría, Querétaro. Recuperado el Octubre de 2016
- Témez, J. (1978). *Calculo Hidrometeorológico de Caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Madrid: Dirección General de Carreteras.
- The Constructor - Civil Engineering Home. (s.f.). Pluviograma y pluviógrafo. *Types of rain gauges for measuring rainfall data*. Obtenido de <https://theconstructor.org/water-resources/types-of-rain-gauges/12801/>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

The Critical Flow. (6 de Septiembre de 2010). Intensity Duration Frequency for London. Londres, Inglaterra. Recuperado el 27 de Octubre de 2017, de <https://thecriticalflow.wordpress.com/2010/09/06/intensity-duration-frequency-for-london/>

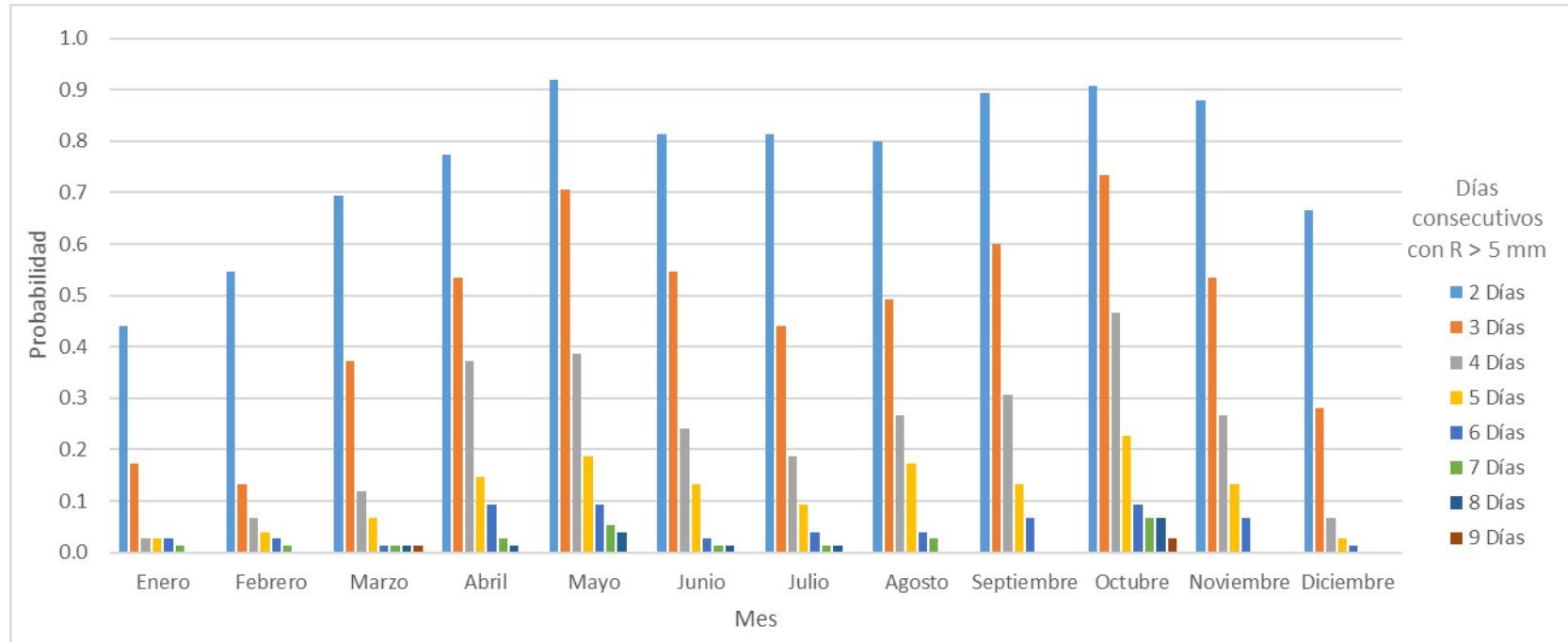
Wikipedia. (Septiembre de 2008). *Wikipedia.org*. Recuperado el Octubre de 2016, de [https://es.wikipedia.org/wiki/Funci%C3%B3n\\_de\\_distribuci%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Funci%C3%B3n_de_distribuci%C3%B3n)

Wikipedia. (Mayo de 2016). *Wikipedia.org*. Recuperado el Octubre de 2016, de [https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%B3pulas\\_\(Teor%C3%ADa\\_de\\_probabilidad\)](https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%B3pulas_(Teor%C3%ADa_de_probabilidad))

Yogeswaran, K., Kumaraswamy, M. M., & Miller, D. R. (1998). Claims for extensions of time in civil engineering projects. *Constr. Manage. Econom.*, 283-293.

## ANEXO 1

**Anexo 1.- Gráfica de la probabilidad de tener entre 2 y 9 días consecutivos con lámina de lluvia superior al umbral de 5 mm por mes.**



Fuente: Elaboración propia